

Ю. БЕРЕЖНОЙ, В. СИНЕДУБСКИЙ

Химия — электричество

ИЗДАТЕЛЬСТВО
«СОВЕТСКАЯ РОССИЯ»
Москва — 1966


ХИМИЯ
И КОММУНИЗМ

Ю. БЕРЕЖНОЙ,
В. СИНЕДУБСКИЙ

ХИМИЯ — ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Под редакцией
члена-корреспондента
Академии наук СССР **В. Г. Левича**

ИЗДАТЕЛЬСТВО
«СОВЕТСКАЯ
РОССИЯ»
Москва — 1966

541
Б 48

Электрохимия — большая ветвь науки, олицетворяющая союз химии и электричества. Первые самостоятельные шаги сделаны ею более ста семидесяти лет назад. Однако она и не думает исполнять свою «лебединую песню», ибо деяниями своими молода, как и прежде.

Ученые все глубже вторгаются в недра электрохимических процессов, стремясь в совершенстве изучить их, научиться регулировать и направлять. Электрохимия ныне — обширная наука, объединившая самые различные направления.

Здесь и проблема топливного элемента, и получение различных новых материалов, в том числе чистых и сверхчистых, и применение новых приборов современной электроники — электрохимических преобразователей.

Настоящему и будущему электрохимии и посвящена книга инженеров Ю. Бережного и В. Синедубского.

„СЕЙФЫ“ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

ПРОБЛЕМА ПРОБЛЕМ



В безобидном солнечном зайчике, упавшем на зеленый лист, отражается первый импульс энергетического круговорота жизни. Благодаря его свету микроскопический «химический завод»

растительной клетки с безукоризненной точностью свершает недоступное человеку: в процессе фотосинтеза из углекислого газа, воды и минеральных веществ образуются сложные органические соединения. Своим появлением они обязаны молекулам зеленого красителя хлорофилла, в которых природа испокон веков консервирует энергию «солнечного зайчика».

Каждый год зеленые аккумуляторы запасают столько солнечной энергии, сколько могли бы дать 200 000 электростанций, не уступающих по мощности Волжской ГЭС имени В. И. Ленина. Уголь, нефтепродукты, торф, сгорая в топках электростанций, в автомобильных и авиационных двигателях, возвращают нам не что иное, как солнечную энергию, полученную миллионы лет назад деревьями, травами, водорослями и микроорганизмами.

Мы спокойны — в ближайшие 10—20 веков человеку не грозит энергетический голод. 500 000 000 000 000 000 киловатт-часов — вот какой астрономической цифрой (и прочесть-то ее трудно!) выражается запас только жидкого, твердого и газообразного топлива. А ведь рядом с ним в недрах земли дремлют еще миллионы тонн урана и тория, способные дать в десять раз больше энергии, чем все ископаемые топлива, вместе взятые. Сегодня нефть, уголь и торф более чем на 95 процентов удовлетворяют мировые энергетические потребности. Подземное тепло,

реки, океанские приливы, ветер, наконец, ядерная энергия — все это, вместе взятое, прибавляет пока каплю — меньше 5 процентов.

Даже в устах инженеров граница между понятиями «энергия» и «электричество» постоянно нарушается, и они звучат как синонимы. На самом же деле электричество имеет неоспоримое превосходство над остальными пятью видами энергии — механической, тепловой, химической, лучистой и ядерной. Оно легко преобразуется в полезную работу, легко «транспортируется» и без него трудно представить сегодняшний мир. Выработка электроэнергии стремительно растет. Вступают в строй новые станции, турбины, котлы, генераторы. Оборудование для них становится все мощнее, надежнее, экономичнее. Кажется, все идет прекрасно? Отнюдь, нет. Мы вправе ответить так потому, что, несмотря на все успехи, природное топливо расходуется еще крайне неумело. Вдумайтесь: средний коэффициент полезного действия, сокращенно к. п. д., всех работающих сегодня в мире энергоустановок лишь чуть превышает 35 процентов.

До чего же невыгодно множить на 0,35 все запасы топлива, которыми мы располагаем. Цифры, приведенные выше, сразу блекнут. Как же более эффективно использовать уже добытое топливо? Это воистину — проблема проблем.

ПРЫЖОК ЧЕРЕЗ СТУПЕНЬКУ

Давайте проследим за путешествием куска угля от момента, когда он попадает на тепловую электростанцию (ТЭС), до того, как заключенная в нем энергия становится электричеством. Сначала — стальные мельницы, где чугунные шары растирают уголь в пыль. Затем дозаторы вдувают «пыль» в топку. В ее адовом пекле атомы углерода и кислорода перемешиваются и соединяются в вихре химических реакций. Вода в трубах, обвивших топку, становится уже не водой, а паром. Сквозь сопла обрушивается он на лопасти паровой турбины. Ее вал, делая несколько тысяч оборотов в минуту, вращает ротор электрогенератора. Там и рождается электрический ток.

Итак, вначале у нас был кусок угля — средоточие химической энергии. Мы сожгли его в топке — и тем самым превратили химическую энергию в тепловую. Запишем этот процесс сокращенно — «Х — Т». Затем полученное тепло отдали воде — «Т — Т». В турбине тепловая энергия породила механическую, то есть «Т — М», и в заключение получение электрической энергии — «М — Э».

Ступенек в этой энергетической цепочке «Х — Т — Т — М — Э» всего четыре. Но и их более чем достаточно. Энергетические превращения «просто так» не происходят. С каждой ступенькой цепочки связаны потери энергии. Часть химической энергии наше-

го многострадального куска угля пропала уже при неполном сгорании, другая часть рассеялась и ушла вместе с отработанным паром, третью похитило трение в турбине, и т. д. и т. п. В итоге — больше половины химической энергии, имевшейся вначале, не принесло пользы.

Так, «вхолостую» сжигаются горы угля, растрачиваются годы тяжелого труда шахтеров. Как ни огорчительно, но любая ТЭС мощностью в миллион киловатт выбрасывает, иначе не скажешь, буквально «в трубу» тепловую энергию, эквивалентную почти двум миллионам киловатт. А это все равно что еще две такие же станции. Где же выход?

Скажем откровенно, стремление улучшить каждую «ступень» в отдельности сегодня еще можно рассматривать как результативную меру. Поставим более экономичные агрегаты — и потери, пусть незначительно, но уменьшатся. А если смотреть в будущее? Нет, тогда нужны не половинчатые, а кардинальные нововведения. Вот почему необходимо избавиться от традиционной «многоступенчатости» и вырабатывать электроэнергию коротким, а следовательно, и более экономичным способом. Выкинем прочь промежуточные ступени, никаких переводов «Х» в «Т» и так далее. Попробуем напрямую: «Х — Э»!

Если призадуматься, то мысль обращается к истории, и на память приходит... да, весьма почтенный по возрасту гальванический элемент.

НАЧАЛОСЬ С ЛЯГУШКИ...

Прежде чем рассказать о гальваническом элементе, необходимо небольшое отступление. Начнем с того, что профессор Болонского университета Луиджи Гальвани с удовольствием препарировал лягушек и не помышлял ни о чем, кроме своей любимой анатомии. Он, понятно, и не подозревал, что история совсем другой науки — химии — навсегда сохранит его имя.

В один прекрасный день — это было в 1770 году — он подвесил очередную мертвую лягушку на железный крючок. И вдруг совершенно случайно заметил: мускулы лягушачьей лапки, прикасавшиеся к металлическим перилам балкона, судорожно сокращались. Гальвани забросил анатомию и увлекся опытами. Он ставил их один за другим, а спустя десять лет сделал вывод о том, что внутри лягушки есть особое «животное электричество».

Другой итальянец — Александр Вольта — тоже был профессором, правда, не медицины, а физики. Свое внимание он сосредоточил на металлической части гальванической цепи: ведь еще Гальвани подметил, что движения лапок мертвой лягушки происходят тогда, когда мышцы и нервы соединяют два разных металла. Значит, разгадка гальванической цепи кроется именно в контакте металлов, а не в «животном электричестве». Лапка же лягушки — просто чувствитель-

ный прибор, обнаруживающий электричество!

Лягушки перестают интересовать Вольта. В 1800 году он придумывает электрический «столб». Шестьдесят кружков серебра и столько же цинка. Каждая пара пластинок соединяется с другой куском влажного картона. К крайним пластинам — цинковой и серебряной — Вольта присоединяет проволочки и при их замыкании получает такую искру, которая даже раскаляет провод.

Цинковые пластины при работе «столба» всегда покрывались белым налетом гидроокиси, но Вольта смотрел на это как на докучливую помеху и с досадой соскабливал налет. Провода часто лежали перед ним в воде, но Вольта не задумывался о происходившем при этом разложении воды. Он был увлечен электричеством, но не знал ничего о химических превращениях, которые вызывает оно в жидкости. Превращения же эти были столь существенны, что позже послужили основой для самостоятельного направления в науке — электрохимии.

ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ В СТАКАНЕ

В стакане из глины — голубая жидкость. Это — медный купорос. В нем — медная пластина. Стакан помещен в другой — стеклянный, в который тоже налит купорос, но цинковый. В него погружена цинковая пластина.

Провода от обеих пластин соединяет электрическая лампочка. Она горит. Перед нами, по сути дела, маленькая предельно простая электростанция.

Чему же обязан ток своим возникновением? Каким образом течет он в цепи, образованной металлическими проводами и раствором купороса? Почему его нет, если обе пластины медные или если вместо жидкого проводника — купороса — в стаканы налита обычная вода?

Ответ на все эти вопросы был найден не сразу. Многие десятилетия описанное или сходное с ним устройство из металлических электродов и растворов некоторых (но не всяких!) веществ служило единственным способом получения электрического тока. Длинная цепь открытий, упорной работы и многочисленных разочарований протянулась от первых опытов Гальвани и до создания Вольта первой динамо-машины — знакомой сегодня каждому.

Теперь-то нам совершенно ясен механизм процессов между обеими пластинками и раствором, понятно и почему появляется ток в цепи. Мы умеем заранее предсказывать все свойства подобного рода систем, получивших название химических источников тока.

Слово «химических» сразу дает понять, с какого рода превращениями связано возникновение тока. На поверхностях металлических пластин и в растворе происходят замечательные превращения. Они и похожи и

не похожи на те, что наблюдаются в более привычных химических реакциях. Электрохимия, лежащая на грани между химией и физикой, и занимается их изучением.

А теперь — о терминах, которые мы уже упомянули, и о тех, с которыми еще не раз встретимся. Они известны многим, но напомнить о них нелишне.

В то время когда изменения, производимые в жидкости током, казались загадочными, электрохимия походила на навигационную карту без всяких названий, позволяющих ориентироваться. Англичанин Майкл Фарадей первым дал названия ее «морям», «отмелям» и «гаваням». Вот они.

Жидкие проводники — прежде всего водные растворы солей кислот и оснований, иначе проводники второго рода, а в обиходе—электролиты (по-гречески — разлагаемые электричеством). Металлические пластины, помещаемые в раствор,— электроды (пути «электра»). Электрод, по которому в раствор входит положительное электричество,— анод (путь вверх, путь восходящего Солнца), а по которому электричество выходит,— катод (путь вниз, путь заходящего Солнца). Заряженные частицы электролита, странствующие по раствору к электродам,— ионы (путешественники).

А что значат слова «течет ток»? Оказывается, слово «течет» сохранилось с тех времен, когда ученые еще не понимали, что электрический ток — это перемещение в

пространстве заряженных частиц — электронов и ионов.

Наиболее очевиден электрический ток в металлической проволоке. А между тем прямое, непосредственное обнаружение носителя тока в металлах было произведено только 50 лет назад. Выяснилось, что в них — огромное количество электронов, оторвавшихся от атомов и свободно двигающихся по всему объему металла. У хороших проводников — меди, серебра — от каждого атома отрывается по электрону. Атом, потерявший один или несколько электронов, превращается в положительно заряженный ион. Но в твердом металле ионы плохие путешественники — они прикреплены к своим местам в кристаллической решетке.

Таким образом, металл — это совокупность «непутешествующих путешественников» — ионов и оторвавшихся от них электронов—легчайших отрицательно заряженных частиц. Именно последние путешествуют уже по-настоящему. Достаточно приложить к металлу внешнее электрическое поле и беспорядочное движение электронов становится направленным. Огромное их количество устремляется в одну сторону, возникает электрический ток.

Скорость движения электронов очень велика — не менее 1000 километров в секунду. Естественно было бы принять за направление тока как раз то, в котором движутся электроны. Однако по исторической тради-

ции направлением (положительным) тока принято называть как раз обратное направление. Вообще с током познакомились и даже построили динамо-машины раньше, чем узнали, что представляет собой он в действительности. Но уже на заре изучения электрических явлений выяснилось, что наряду с металлами электричество проводят и некоторые жидкости.

НЕТОРОПЛИВЫЕ ПУТЕШЕСТВЕННИКИ

Любому человеку, хотя бы немного знакомому с химией, хорошо известно, что чистая (дистиллированная) вода очень плохой проводник электричества. Знает он и то, что кристаллы обыкновенной поваренной соли совсем не пропускают тока. Но опустите их в воду и подождите, пока они растворятся. На ваших глазах из двух непроводников возникнет довольно хороший проводник электричества.

В чем же дело? Оказывается, растворяясь, поваренная соль претерпевает глубокие изменения. Частицы натрия и хлора, из которых построен кристалл твердой поваренной соли, переходят в воду и образуют раствор соли. При этом оказывается, что каждый атом хлора прихватывает с собой лишний электрон. Такой заряженный атом с избыточным электроном называется отрицательным ионом. Напротив, натрий существует в растворе в виде атомов, потерявших электрон,

т. е. в виде положительных ионов. Разумеется, общее число положительных ионов натрия и отрицательных ионов хлора равно между собой, так что раствор, как и исходный кристаллический образец соли, является электрически нейтральным.

Подключите к раствору клеммы источника электрического напряжения — ионы задвигаются. Положительный ион поползет к отрицательному полюсу, отрицательный — к положительному. Именно поползет, так как его скорость — одна тысяча или несколько десятитысячных долей сантиметра в секунду. Хотя ионов в растворе очень много, мизерная скорость их движения не позволяет раствору проводить ток столь же хорошо, как это делают металлы.

Раствор поваренной соли — только один пример образования электролита. Но и его достаточно, чтобы понять: ток в металле и электролите течет по-разному. В первом случае — это движение электронов, во втором — ионов (каждого в свою сторону) и с разными зарядами. Электрические свойства металлов и других твердых проводников изучаются в теории твердого тела, а электролитов — в электрохимии.

Возникает, однако, естественный вопрос — а где же здесь химия, где проявляются специфические свойства различных атомов? Оказывается, проявляются — и химические свойства ионов играют важнейшую роль в поведении жидких проводников. Об этом даль-

ше, а сейчас обратим внимание на один очень важный момент.

Итак, чтобы ток циркулировал по цепи, он должен пересечь границу между твердым и жидким проводниками. На ней-то, или, точнее, в тончайшем слое электролита, прилегающем к границе, происходят решающие события.

Мы уже сказали, что цинк или медь переходят в раствор купороса в виде положительных ионов. И этот процесс не что иное, как химическая реакция, которую просто выразить формулой:

$$Cu \rightarrow Cu^{++} + 2e$$

Здесь Cu — химический символ меди, Cu^{++} — иона меди, e — электрона. Возможна и обратная реакция. Ионы меди, переходя из раствора на медную пластину, приобретают электроны:

$$Cu^{++} + 2e \rightarrow Cu$$

Процесс, в котором атомы меди теряют, а ионы меди приобретают электроны, мы назвали химической реакцией отнюдь не случайно. Перегруппировка, обмен электронами — главный момент во всяком химическом превращении. Простейшие реакции обмена одним или несколькими электронами называются окислительно-восстановительными. Потеря атомами, молекулами или ионами электронов — окисление, а приобретение — восстановление.

Такие реакции особенно часты на границе раздела металла — неограниченного резервуара электронов — и электролита. Изучение этих реакций — вторая и в настоящее время основная задача электрохимии — действительно пограничной науки, не только лежащей между химией и физикой, но и изучающей химические процессы, идущие на «границе» металл — электролит.

Мы будем говорить еще об окислительно-восстановительном процессе, а пока вернемся к нашей миниатюрной электростанции. Частицы цинка переходят в раствор цинкового купороса в виде двухзарядных ионов. Это значит, что на каждый ион цинка, находящийся в растворе, приходится два «лишних» электрона, оказавшихся в металле. Эти электроны переходят из цинковой пластинки (анода) по проволочке к медной пластинке (катоду). Здесь идет процесс до известной степени противоположный тому, который происходит на цинковой пластинке. И двухзарядные ионы меди, находящиеся в растворе в непосредственной близости от катода, нейтрализуются, получая при этом два электрона, и оседают на медной пластинке. Их место в растворе занимают двухзарядные ионы цинка, которые «продираются» через поры в глиняной перегородке. Таким образом, ток к проволочке переносят отрицательные электроны, а ток в растворе — положительные ионы цинка и меди.

Итак, реакция вытеснения меди из собст-

венной соли цинком сводится к передаче электронов от атомов цинка к ионам меди: «территориальное» разделение этих металлов и позволяет получить электрический ток. Включив вольтметр, увидим — 1,1 вольта. Таково электрическое напряжение, которое гонит электроны по проводу.

Потерпите еще немного и наше теоретическое собеседование закончится. В заключение же попробуем разобраться, почему медь «капитулирует» перед цинком, а не наоборот? Механизм хитрый, но понять его важно для дальнейшего. Суть, оказывается, в том, что заряд любого металла зависит от степени сродства его ионов к электронам и воде. «Сродство» в электрохимии подчеркивает «родственную» близость реагирующих веществ. Атомы цинка легче теряют электроны и, превращаясь в ионы, быстро «налаживают контакты» с водой. Поэтому цинковая пластинка, погруженная в раствор своей соли, и ионов посылает больше и плотность избыточных электронов на ее поверхности больше, чем на медной. В результате — цинк становится «более электроотрицательным», чем медь. Когда пластины соединяют проволокой, некоторая часть избыточных электронов, воспользовавшись ею, перейдет от цинка к меди. Тем самым электрическое равновесие на электродах нарушается и, стремясь его восстановить, атомы цинка «ныряют» в раствор и ионы меди «выныривают» из него.

Скорость процесса будет зависеть не

только от того, сколько ионов меди успеет подойти к медному электроду, но и от напряжения электрического поля у его поверхности. На границе между электродом и раствором — своеобразный молекулярный конденсатор, или иначе двойной электрический слой. Его образуют заряды, «сидящие» на поверхности металла,— электроны и положительные ионы в тонком слое электролита. Если бы удалось «втиснуть» между слоями фантастически крошечный проводок, по нему бы мгновенно пошел ток. Размеры конденсатора сравнимы с молекулярными, а напряженность в нем достигает огромной величины — десятков миллионов вольт на сантиметр. Столь мощное электрическое поле сильно влияет на реакции, идущие на поверхности электрода. Заметим, что они всегда сопровождаются переходом электрона.

Подчинить такие вот реакции, называемые электродными, то есть научиться направлять и регулировать их, чрезвычайно важно. Ведь благодаря им работает большинство электрохимических устройств — от карманного фонарика до топливного элемента. Но любая реакция отражает лишь старт и финиш процесса. А что было на промежуточных этапах? Какие пружины двигают взаимодействием? Есть ли у реакции побочные русла? С какой скоростью развивается она во времени? Как зависит ее скорость от температуры, давления и прочих факторов? В общем, какова кинетика реакции? Воссоз-

данием всего этого в целостную картину и занята электрохимия на нынешнем этапе своего развития.

...Веками химики смешивали, сплавляли, спекали в ретортах, колбах и пробирках одни вещества с другими. Манипуляции завершались обычно получением газов, жидкостей, кристаллов. Но однажды синтез двух веществ породил нечто совершенно иное — электрический ток. Все, что связано с ним, чрезвычайно богато открытиями и изобретениями, преобразившими окружающий нас мир. Одними из первых стояли у истоков появления и «приручения» электричества гальванические элементы. И сегодня они, правда, ставшие несравнимо совершеннее и компактнее своих предшественников из восемнадцатого века, не растеряли былой славы.

СКЛАДЫ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Космический корабль пробивает плотные слои атмосферы... Пора приступать к работе. Из корпуса выдвигается параболическое зеркало. Система ориентации поворачивает посланца земли «лицом» к солнечным лучам. Их энергию, преображенную в «крыльях» солнечных батарей в электрический ток, начинают поглощать научные приборы. Но вот корабль входит в теневую сторону земли. Теперь вся надежда на «дублера» — аккумулятор. Да-да, тот самый, далеким-предалеким предвестником которого можно считать

«столб», построенный Александром Вольта и служивший источником длительного постоянного тока.

Первый электромотор, первый проволочный телеграф, первое разложение воды на кислород и водород. Все эти важные открытия и изобретения не были бы сделаны без электрохимических источников тока. Им обязаны мы, пожалуй, и важнейшим из всех «первых» — первым знакомством, но уже не с зарядом, а с потоком электричества. Ом, Фарадей, Кирхгоф и другие корифеи электротехники, опираясь на все те же простейшие гальванические элементы и аккумуляторы, обогатили науку почти всеми классическими законами электричества.

Нет сомнения: химические источники тока — подлинные труженики. До середины прошлого века они вообще не знали, что значит конкуренция. Но потом... Впрочем, ничего из ряда вон выходящего не произошло. Наоборот, случилось даже то, что в истории бывало не раз: та или иная машина или процесс, слывшие незаменимыми десятками, а то и сотнями лет, внезапно отступали на задний план. Лишь переход очередного рубикона науки так же неожиданно возвращал им былое и они возрождались вновь. Такую шутку сыграла жизнь и с химическими источниками тока. Изобретение динамо-машины (слов нет — событие революционное) быстро и надолго отбросило гальванические источники в тень. К началу нашего века они встреча-

лись лишь в виде сухих батарей в переносных фонарях, домашних звонках и других второстепенных устройствах. Надежд на более важные поручения не предвиделось. Поговаривали, и, казалось, не без основания, что электрохимия — отмирающая ветвь науки.

Но кончился период известного обособления классических наук, бывший столетие назад, на смену ему пришло бурное взаимовторжение идей физики и химии, и электрохимия вновь заиграла всеми своими гранями. События, на первый взгляд весьма далекие от проблем источников тока, убыстрили крутой поворот в их судьбе.

ПРЕОБРАЗИВШИСЬ — НА СПУТНИК!

Человека потянуло в небо, и крылатые машины сразу же потребовали не только новых моторов, но и небольших, легких, но довольно емких аккумуляторных батарей — своеобразных «сейфов», которые могли бы в достатке накапливать электроэнергию, надежно хранить ее и по первому требованию возвращать. И они появились, сохранив принцип конструкции, известный еще Александру Вольта.

Ящик с электролитом (серной кислотой или щелочью) и две пластины, опущенные в него,— вот и весь простейший аккумулятор. Пластины бывают свинцовые, никелевые, цинковые, железные и из других металлов. Соответственно и процессы в аккумуляторах,

сохраняя одну и ту же сущность, несколько различаются.

Что же происходит в аккумуляторе?

На пластинах свинца, погруженных в серную кислоту, образуется соединение — сульфат свинца, нерастворимый в кислоте. Когда им покроется вся поверхность свинца, процесс прекратится. Если теперь пропускать через аккумулятор ток, то на одной его пластине частицы свинца, входящие в сульфат, начнут получать электроны (восстанавливаться) и превращаться в нейтральные атомы. На другой — частицы свинца, входящие в сульфат, будут отдавать электроны и из двухзарядных ионов превращаться в четырехзарядные. В таком виде они и попадут в новое соединение — свинцовую двуокись.

Другими словами — на первой пластине создается избыток электронов, на второй — нехватка. Аккумулятор заряжается. При разрядке процесс течет в обратную сторону: запасенная химическая энергия превращается в электрическую... На обеих пластинах количество электронов начинает выравниваться. Причем происходит это до тех пор, пока все атомы свинца не перейдут в исходное двухзарядное состояние и на пластинах аккумулятора не осядет слой сульфата.

...Аккумуляторы сегодня летают в космос, служат и на более низких высотах, на земле и воде, и даже в глубинах океанов. Если бы они вдруг, по злому волшебству, исчезли — более 100 миллионов автомобилей с моторами, «по-

терявшими искру», замерли бы на дорогах, ни один самолет не поднялся бы ввысь, погас бы свет в поездах и палатках геологов, замолкли бы тысячи радиостанций. Все это так, но не стоит закрывать глаза на то, что аккумуляторы еще далеки от того, какими бы мы хотели их видеть. Большая мощность с единицы веса и объема, независимость «качества» тока от времени работы, умение на долгий срок запасать энергию — даже эти перечисленные, и к тому же далеко не все, желания трудносовместимы.

У современных аккумуляторов, как ни стараются конструкторы, недостатков пока еще немало. Даже у тех, что предназначены для форсированного сбыта энергии, один ватт «весит» около десяти граммов. Чтобы накопить впрок энергию Братской ГЭС, потребовался бы аккумулятор с Московский университет. Облегчить аккумулятор, сохранив его необходимую «емкость»,— вот заявка номер один и в первую очередь космической техники. Уже достигнуты довольно серьезные успехи. Аппаратура космических объектов благодаря аккумуляторам работает без остановок и тогда, когда дневное светило не освещает солнечные батареи. И можно не сомневаться, здесь они выдержат конкуренцию даже с атомными батареями (а ведь еще их и создать надо) для бортового питания.

О весе уже упоминалось. Если аккумулятор «Волги» не очень тяжел, то на ТУ-104 — его не поднять одному человеку, а на подвод-

ной лодке тем более. На самолете с дополнительными килограммами еще можно смириться, но на космической ракете громоздкость и лишний десяток граммов становятся предметом особого рассмотрения.

Шаг к миниатюризации удалось сделать еще в 40-х годах, когда инженеры создали серебряно-цинковые аккумуляторы, емкость которых при одинаковых размерах в пять-шесть раз выше, чем у всех других типов. Ящичек размером с небольшую книгу способен давать ток силой до одного ампера при шестивольтовом напряжении в течение 100 с лишним часов.

Конструкция этих аккумуляторов оригинальна. Электроды спрессованы из серебряного и цинкового порошков в тонкие пластинки. Их толщина — полмиллиметра. Между пластинками — несколько слоев синтетической пленки, насыщенной щелочным электролитом. Вся пачка электродов и пленок, плотно прижатых друг к другу, представляет собой компактный ящичек. Именно такой легкий источник тока вместе с солнечной батареей унес в космос еще третий советский спутник! Однако недавний фаворит — серебряно-цинковый аккумулятор — далек от идеала: сам по себе он понемногу разряжается, а значит, не долго хранит энергию; невелико у него и число рабочих циклов.

Все источники тока, с которыми мы успели познакомиться (от примитивных и до последнего крика «аккумуляторной моды»), за-

няты одной работой — питанием приборов. А можно ли ожидать, что они перекочуют из «малой» энергетики в «среднюю»?

У КОЛЫБЕЛИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

Жарко летом в большом городе. И ночью раскаленные за день асфальт и громады зданий излучают тепло. Вы распахиваете настежь окно, но вместо живительной свежести в него врывается бензиновая гарь. Тут уж ничего не сделаешь. Машины выбрасывают выхлопные газы прямо в воздух. От автомобиля не избавишься, но, может, тогда от мотора?

В 1964 году на выставке в Лондоне демонстрировался удивительный легковой автомобиль. Обычный мотор заменили в нем электродвигателями. Аккумуляторы, питающие их, расположены под сиденьями и весят 610 килограммов. Заряжаются они от сети специальным приспособлением, имеющимся в машине. Скорость автомобиля 60—70 километров в час, одной зарядки аккумуляторов хватает на 100 километров пробега. Для начала как будто не плохо: полная бесшумность, никакого загрязнения воздуха, простота обслуживания и управления.

А электрический трактор или электрокомбайн, созданные по аналогичной схеме, а не «привязанные» кабелем (как это было уже в неоднократных экспериментах), могли бы стать хорошими партнерами для обычных —

с двигателями внутреннего сгорания. Если бы появились мощные высокоемкие аккумуляторы, то электровозу стала бы не нужна контактная сеть. Разве все это не заманчиво?

Что говорить — очень заманчиво! Но аккумуляторам уже более сотни лет. Они изменялись, улучшались и все же не смогли пока превратиться в небольшие, но мощные накопители энергии. Что же сулит им будущее?

И МАЛ, И ДОРОГ

Сегодня на одного жителя нашей планеты приходится больше 100 ватт мощности. Прямо скажем — немного, особенно учитывая, что природные ресурсы не накладывают никаких «вето» и каждый человек мог бы стать обладателем (при тех же расчетах) тысяч и десятков тысяч ватт. Но для этого на смену удручающе невыгодным способам получения электричества должна прийти формула прямого преобразования энергии — «Х — Э».

Почему же она никак, несмотря на очевидные преимущества, не заявит о себе во весь голос?

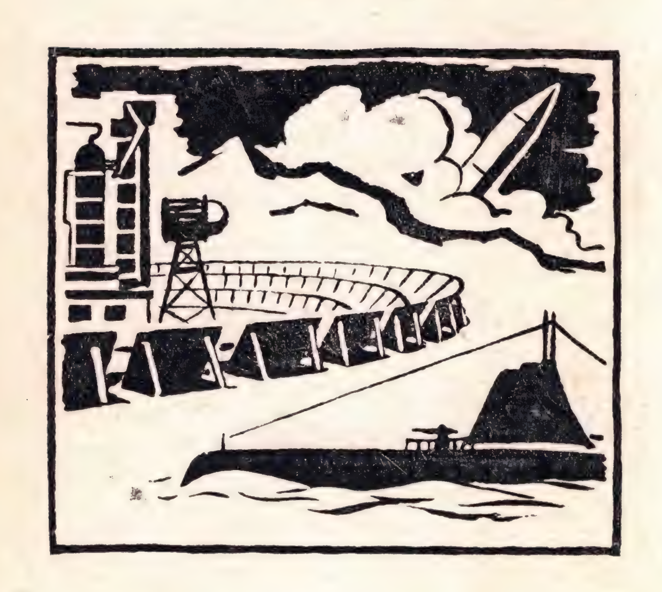
Пожалуй, потому, что, если изменить поговорку,— золотник «и мал, и дорог». Во-первых, таким путем много энергии не получишь, так как химические источники недолговечны. Они быстро утрачивают работоспособность, и их надо либо заменять новыми, либо, как аккумуляторы, отправлять на перезарядку. Во-вторых, им нужно не «настоящее»

топливо, а цветные металлы и другие дорогостоящие химические вещества, тогда как горючее обычных тепловых машин — уголь, природные газы, нефтепродукты — и доступнее и дешевле. И хотя способы их использования далеки от идеала, второй путь преобразования, то есть формула «Х—Т—М—Э», оказывается на сегодня выгоднее, чем просто «Х—Э» — получение электрической энергии прямо из химической.

Но пока мы обратили внимание лишь на некоторые, явные различия. Более же глубокие состоят в том, что при превращении химической энергии в электрическую через тепловую мы пользуемся простыми и хорошо изученными физическими явлениями (закон теплового расширения газов, электромагнитной индукции и т. д.), а при «Х—Э» необходимо знание сложных процессов молекулярного характера. Природу их нельзя было прояснить без углубленных представлений о строении вещества и электрохимических закономерностях. Именно поэтому гальванические источники тока, хотя и были созданы давно, долго являли собой результат чисто эмпирических поисков.

За последние годы ситуация резко изменилась. Наши познания в физике и химии углубились и стали толчком для качественно нового способа перевода одного вида энергии в другой.

ГОРЕНИЕ БЕЗ ОГНЯ



«ЖИВАЯ» МАШИНА

Сначала — любопытное интервью. Попросим поэта, врача и химика поделиться мнениями о человеческом организме. Выслушав ответы, не удивляйтесь тому, как по-разному видится им одно и то

же. Поэт глубокомысленно говорит: «Человек — венец мироздания», врач не без скепсиса замечает, что это прежде всего — потенциальный пациент. А вот резюме химика, пожалуй, наиболее прозаично: «Человеческий организм — великолепная тепловая машина».

Примем последнюю точку зрения. Но где же топливо?

Как вы уже тоже, по-видимому, догадались, речь идет о пище. А теперь смотрите, насколько рациональней потребляется это «топливо», особенно в сравнении с тем, что происходит в самом лучшем тепловом агрегате. 60—70 процентов — вот какими цифрами выражается коэффициент превращения энергии пищи в механическую энергию мускульных сокращений.

В чем секрет такого совершенства? Ведь как в живом организме, так и в тепловой машине происходит одна и та же реакция горения, то есть окисление содержащего углерод топлива кислородом воздуха. И продукты окисления те же — углекислый газ и вода. Но (и это «но» весьма существенно) в живом организме в отличие, допустим, от двигателя автомобиля энергия реакции избегает невыгодного перехода в тепло и сразу вызывает мускульные сокращения. Этот процесс можно назвать «холодным горением».

Огненные вихри бушуют в цилиндрах тракторов и самолетов, в топках котельных, в камерах газовых турбин. Температура па-

ра и газов достигает 500—1000 градусов Цельсия. В живом же организме температура как в зоне «горения», так и в месте потребления энергии (в мускулах) всегда одинакова— не больше 37—42 градусов.

Все происходящее с «топливом» в организме, скажем человека, загадочно и сложно. Наука далеко еще не распознала до конца молекулярную природу этих процессов. Причем люди мечтают не просто постигнуть сложнейший механизм, выдержавший тысячелетние испытания, но и, создав по его подобию «неживые» машины, научиться управлять ими.

Можно, однако, и по-другому осуществить реакцию «холодного горения».

ВСЕГДА ЛИ ПЛАМЯ НЕЗАМЕНИМО?

Слово «горение» в житейском обиходе воспринимается просто: при горении есть пламя и тепло. Союз вроде бы незыблем. И все же нельзя ли обойтись и без того, и без другого?

Попробуйте поинтересоваться, и 95 человек из 100 сочтут вас шутником, а кое у кого мелькнет мысль и о том, что, мол, такая неграмотность до добра не доведет. А вот электрохимик не удивится: «Эка невидаль. Конечно же, можно сжигать и без огня...»

Соглашаться с этим мнением или нет? Чтобы решить — вернемся к кислороду. Мы ведь упомянули вскользь, что именно он «ви-

новник» горения. Итак, для горения необходим кислород. Тогда почему водород или скипидар горят в атмосфере хлора, отравляющего легкие живого существа, а магний — в углекислом газе? Потому что понятие «окисление», обязанное своим рождением кислороду, распространяется на весьма широкий круг реакций. Например, тот же водород может быть окислен и хлором. Или, наоборот, водород — «окислитель», а хлор — «топливо». От такой смены названий сущность, разумеется, не меняется. Кислородное же горение — лишь частный случай окислительно-восстановительных процессов.

Что же в конце концов представляет собой огненная стихия? Ведь и дыхание людей, и ржавление металлов тоже являют собой типичные окислительно-восстановительные процессы, ну а пламени при этом никакого нет и в помине.

Объяснение кажущегося несоответствия—в разной скорости протекания реакций. Когда процесс горения, пусть весьма условно, разделяют на «холодный» и «горячий», то различие между ними видят как раз в этом. Если говорить о дыхании, то окисление здесь идет сравнительно медленно, и организм усваивает энергию постепенно. «Горячее» же горение — быстротечный процесс, и пламя — поток раскаленных газов — неотъемлемая его часть.

Перенесемся в мир атомов и электронов. Как только это произойдет, мы вправе опре-

делить «горячее горение» как химическую реакцию, в которой топливо — углерод, водород и другие элементы — безвозмездно отдает электроны кислороду или любому другому «окислителю».

При этом перескоки электронов от одного атома к другому происходят на ничтожно малые молекулярные расстояния и в движении этом нет никакой направленности. Но если бы нам удалось поместить между атомами топлива и окислителя не видимые глазом электрические лампочки, они бы на какое-то мгновение зажглись. Да, на мгновение! Ведь перескок электрона — еще не ток. Чтобы он возник, нужно заставить электроны проходить, двигаясь по проводам, большие расстояния в пространстве.

Значит, надо уничтожить перескоки, «короткие замыкания». В то же время совершенно очевидно, что это немыслимо до тех пор, пока «ведущие персонажи» реакции — топливо и окислитель — смешаны. Тогда, придерживаясь логики, необходимо сначала разделить продукты горения и затем, регулируя скорость процесса, вводить их в соприкосновение друг с другом.

Представим, что атомы или молекулы «топлива» удалось заставить отдавать электроны не окислителю, а некоторому резервуару электронов — например, металлическому электроду. Что же касается окислителя, то его следует заставить получать электроны не от молекул топлива непосредственно, а из

того же «резервуара». С молекулярной точки зрения итог был бы прежним. Но если соединить электроды — получающий электроны от «топлива» и отдающий электроны «окислителю» — металлическим проводом, то они будут совершать длинный путь, прежде чем попадут от молекул топлива к молекулам окислителя. И что самое главное — процесс окисления будет включать в себя стадию электрического тока.

Но ток — всегда ток, чем бы он ни вызывался. Поэтому его можно заставить совершать полезную работу ничуть не хуже, чем всякий другой.

ХОЛОДНОЕ СЖИГАНИЕ

Когда-то люди несказанно изумились, обнаружив, что пламя способно породить своего врага — воду. Но так или иначе, в результате горения водорода в кислороде образовалась именно вода. Сегодня смысл этой незамысловатой реакции очевиден, как никогда. Кстати, давайте припомним известный школьный опыт...

В сосуде с водой — два металлических электрода. Проводами они соединены с аккумулятором. Если дать на электроды достаточно большое напряжение, то возле них сразу же появятся газовые пузырьки. Один из образующихся газов, собранный в перевернутую банку, легко поджигается — это явно водород. Второй — заставляет вспыхивать тлеющую спичку: значит — кислород. Таким

образом ток разлагает воду на две ее элементарные составные части.

А что, если повернуть реакцию вспять? То есть взять кислород и водород и попробовать соединять их между собой. При этом словно по поговорке «долг платежом красен» должна возвращаться энергия, затраченная на разложение воды. Если умело провести эту реакцию, то «возвращенная» энергия превратится в электричество.

Мы неспроста уделили так много времени опыту из ученической программы. Если он ясен, то, значит, будет понятен и принцип действия топливного элемента с водородом в качестве топлива, ибо он как раз и был только что изложен. Короче, топливный элемент представляет собой устройство, позволяющее окислителю сжигать отделенное от него топливо, получая при этом электрический ток. Остается поинтересоваться: каким способом соединяют два в общем-то отнюдь не «покладистых» газа в одну молекулу? Водород в определенной смеси с кислородом (2:1) — это не вода, а гремучий газ, от которого лучше держаться подальше. В топливном же элементе водород и кислород ведут себя вполне миролюбиво, но заставить «поработать» их лучшим, наиболее выгодным для нас образом — задача непростая.

Типы топливных элементов, конечно, отличаются друг от друга, но конструктивно в самом общем виде они представляют собой заполненные электролитом резервуары,

в которые подаются топливо и окислитель.

Пока наиболее полно разработан водородно-кислородный топливный элемент. Разумеется, что непосредственное сжигание водорода с помощью кислорода воздуха не позволяет прямо превращать химическую энергию в электрическую: получается вода и выделяется тепло, которое затем можно использовать (по хорошо известной схеме) для выработки электричества. Поэтому поступим иначе: разделим горение водорода на две реакции. В одной пусть участвует водород, в другой — кислород. Конструктивно наш электрохимический генератор выглядит так: в щелочном электролите—едком калии—два трубчатых электрода из пористой смеси углерода и никеля—своеобразного металлического материала — карбоникеля, получаемого спеканием угольного и никелевого порошков.

Начнем вдувать в отверстие одного из электродов водород. Что же произойдет? На границе электрод — электролит молекула водорода распадается на два атома, которые «прилипают» (адсорбируются) к поверхности карбоникеля. Каждый атом в свою очередь разрывается на электрон, который он дарит металлу, и на положительно заряженный ион. Вся реакция идет на границе трех фаз: газообразный водород — металл — раствор. В итоге появляются электроны на металле и ионы водорода в щелочи.

Аналогичные перипетии претерпевает и молекула кислорода, входящего внутрь вто-

рого пористого электрода. Правда, здесь реакция сложнее. Не стоит останавливаться на деталях. Важно лишь, что из кислорода, молекул воды и электронов, которые отрываются от металла, рождаются отрицательные ионы «водного остатка» ОН (о—аш), а на металле появляются положительные заряды, или, как говорят физики, электронные дырки. Значит, на кислородном электроде необходимо срочно восполнить утерянные электроны. Чем же? Конечно же, водородными электронами. Теми самыми, что образовались «напротив» и проскочили через внешнюю цепь. Но ведь движение потока электронов— это же электрический ток и, следовательно, топливный элемент работает.

Ну, а какова судьба ионов водорода и «водного остатка» ОН? Двигаясь по электролиту, они благополучно встречаются и образуют воду. С точки зрения количественной, холодное «сжигание» ничего не изменило. Брали два исходных вещества — водород и кислород, получили один конечный продукт — воду. Но при обычном горении химическая энергия топлива передается продуктам горения, а здесь — создает перемещение электронов во внешней цепи, то есть электрический ток.

КОГДА К. П. Д. ИДЕАЛЕН

Не знаем, обратили вы внимание или нет, но топливный элемент можно, пожалуй, сравнить с самым популярным сегодня двига-

телем — внутреннего сгорания. И в тот и в другой непрерывно поступают топливо и окислитель, а удаляются продукты реакции (вода, выхлопные газы). Результат работы установок — это электрическая энергия в первом случае и механическая работа, тоже превращаемая затем в электричество,— во втором. Однако, несмотря на схожесть, есть и отличия. Они касаются как характера процессов, так и их эффективности. Коэффициент полезного использования химической энергии топлива при холодном «горении» в топливном элементе в 2—3 раза больше, чем при «горячем» — в двигателе внутреннего сгорания или любой другой тепловой машины.

А объясняется это очень просто. В энергетике различные «потери в пути» — в порядке вещей. К примеру, в самых новейших газовых турбинах коэффициент полезного действия — 45 процентов. Конечно, и это неплохо, но ведь больше половины энергии где-то потеряно. И тут уж ничего не сделаешь — законы термодинамики неумолимы.

По одному из этих законов ни при каких условиях тепло не может быть полностью превращено в работу и каждому тепловому циклу уготован свой к.п.д., заведомо меньший ста процентов. Значит, как бы мы ни изощрялись, преобразование химической энергии в электрическую на основе тепловых машин ничего радостного не сулит. А в водородно-кислородном элементе уже в настоящее время 70 процентов энергии превращается в элек-

тричество — вдвое больше, чем в газовой турбине электростанции. Причем экономичность топливного элемента, если избежать кое-каких незначительных потерь, может стать еще выше.

Где же предел? И почему природа великодушна в одном случае и скупа в другом?

Вскользь мы уже ответили на этот вопрос, сейчас же сформулируем его почетче. У вас, надеемся, нет сомнения, что в топливном элементе электроны переходят от атомов одних веществ к другим. Так вот, чтобы энергия, освобождающаяся при таких электронных переходах, превращалась в ток, а не в тепло, нужно «внушить» электронам: кратчайшая дорога не всегда... выгодна.

Да, да, именно так. И если обойтись без популяризации и воспользоваться формулировкой построже, то та же мысль прозвучит так: нужно заставить электроны не переходить сразу от одних взаимодействующих атомов к другим, а избирать обходный путь — через электроды и внешнюю электрическую цепь, в которую они должны отдавать освобождаемую энергию. Если так и поступать, а иными словами, сжигать водород, углерод или что-нибудь другое в топливном элементе (это условие и необходимое, и достаточное), можно достичь теоретического коэффициента полезного действия, равного 100 процентам!

Вот оно где выявилось главное достоинство топливного элемента — ошеломляюще вы-

сокий для уровня сегодняшней техники к.п.д.! Но это на бумаге, изобразить на которой электрохимический генератор очень просто. К сожалению, в жизни все обстоит гораздо сложнее.

ФИЛОСОФСКИЙ КАМЕНЬ ЭЛЕКТРОХИМИИ

Аудитория Политехнического музея была заполнена до отказа. Студенты, инженеры, журналисты ловили каждое слово выдающихся советских ученых об энергетике будущего. Академик Л. А. Арцимович говорил о покорении плазмы, академик В. А. Кириллин — о магнитогидродинамических генераторах. Затем микрофон был передан крупнейшему советскому электрохимику А. Н. Фрумкину.

— Когда выступаешь на таком вечере, очень хочется говорить о чем-то совершенно новом, что появилось в последние годы и поэтому представляется особенно многообещающим,— сказал ученый.— В этом отношении мое положение более трудное, чем у предыдущих докладчиков. Идея создания топливного элемента появилась в середине прошлого века...

В самом деле, не много можно найти примеров, когда от идеи до ее технического воплощения пролег бы столь многотрудный и неблизкий путь, как произошло это с топливным элементом. Принципиальная возможность процессов, происходящих в нем,

была показана английским химиком Уильямом Грове за целых 37 лет до выхода на научную арену урана. Сегодня атомная энергетика уже подготовлена для использования в больших масштабах, а топливный элемент пока не выбрался толком из лабораторий.

Наш соотечественник Павел Николаевич Яблочков еще в 1876 году получил «привилегию» на устройство топливного элемента, в котором в электричество превращается тепловая энергия угля. Ученый знал: в гальваническом элементе можно один электрод сделать из угля вместо металла, и работа его от такой замены не ухудшается. Первый элемент П. Н. Яблочкова состоял из угольного и железного электродов, погруженных в расплавленную соль азотной кислоты. Коэффициент полезного действия установки получился, однако, низким. А что, если оба электрода изготовить из угля? Не станет ли один из них «топливом»? Целых 15 лет Яблочков продолжал настойчиво экспериментировать со все новыми и новыми типами топливных элементов, но успеха так и не добился.

Вслед за ним перспектива «сжигания» топлива электрохимическим способом захватила умы многих ученых. Как из рога изобилия посыпались различные проекты. Любопытно, что когда в 1894 году немецкий физик Вильгельм Оствальд основал Электрохимическое общество, он настоял на том, чтобы главной и первоочередной задачей этого об-

щества считалась замена термодинамической машины «химодинамической». В первом номере «Журнала электрохимии» В. Оствальд писал: «Гальванический элемент, в котором расходуется уголь и к которому каким-либо путем подводится кислород воздуха, явился бы великим открытием, которое превзошло бы открытие паровой машины».

Упорные исследования велись во всем мире. Казалось, что вот-вот цель будет достигнута. Но все попытки одна за другой терпели крах: электроды были малоактивны, конструкции далеки от совершенства, не открыли своих тайн и процессы, протекавшие на электродах. Преграды, моментами казавшиеся исследователям непреодолимыми, побудили того же Вильгельма Оствальда назвать проблему топливного элемента «философским камнем электрохимии».

«Вот-вот» продолжалось еще несколько десятилетий. Лишь в канун второй мировой войны были испробованы первые более или менее приемлемые топливные элементы. В этом большая заслуга советских электрохимиков. Но даже 15 лет назад в одной из солидных монографий отмечалось, что многочисленные исследователи работают над топливными элементами в большинстве случаев совершенно безрезультатно.

Объективности ради стоит заметить, что и сегодня в топливных элементах не все еще вполне ясно, и до сих пор не создано конструкции, полностью пригодной для промыш-

ленного внедрения, хотя размах нынешних работ несравнимо больше довоенного. Работы по прямому превращению химической энергии в электрическую выдвинуты в нашей стране на одно из первых мест. Значение их подчеркнуто в Программе КПСС.

В США, Англии, ФРГ, Франции, Японии в эти исследования вкладываются огромные средства (в США—десятки миллионов долларов ежегодно). Интересно, что в тех же Соединенных Штатах проблема топливного элемента ставится по важности на второе место, уступая лишь атомной энергетике.

В чем же заключается проблема топливного элемента? Почему и сегодня над ней ломают головы ученые нескольких сотен лабораторий всего земного шара?

ПЛЮСЫ И МИНУСЫ

Прежде всего проблема не одна. Топливный элемент — средоточие доброго десятка нерешенных задач. Но это не охлаждает пыла ученых. Потому что в принципе топливный элемент — это та предельная простота, обязанная, конечно, достижениям в сложнейших разделах химии и физики, к которой стремятся исследователи и инженеры. Может быть, через сотню лет школьник легче поймет, что представляет собой топливный элемент, чем то, почему науке середины двадцатого столетия пришлось приложить титанические усилия для его создания.

Производство и применение топливного элемента сдерживается серьезными трудностями в материалах и методах производства. Для элементов, имеющих низкое рабочее давление и температуру, исследователи ищут более дешевые и качественные материалы, а в случае высоких температур и давлений — стремятся повысить безопасность использования и надежность.

Сегодня самое простое и доступное топливо — водород, почти не знающий соперников. Он лучше всего поддается электрохимическому «холодному» горению и «сжигается» даже при комнатной температуре, хотя часто ее слегка повышают — до 100—150 градусов Цельсия. Плод окисления водорода — вода, избыток которой можно легко удалить (это несомненное достоинство) из электролита посредством испарения. Так, по американскому проекту «Аполлон» для полета на Луну предполагается, что вода, испаряемая из водородно-кислородного элемента, будет использоваться космонавтами для питья.

Однако при всех достоинствах водорода он дорог и крайне неудобен для транспортировки (баллон, в котором хранится водород, весит в 50—100 раз больше, чем он сам). В природе свободный водород не встречается. Поэтому его получают искусственно различными способами, например электролизом или из метана с помощью простого химического процесса — конверсии. При этом теряется часть запасенной в метане энергии,

а сам водород разбавлен углекислотой и требует дополнительной очистки. Вывод: водород как «топливо» и хорош и плох одновременно.

Теперь немного о соперниках водорода — углеводородах. Из них построен весь органический мир. Нефть, газ, уголь, торф — все это тоже смеси углеводородов. Раньше высказывались опасения, что из-за своей электрохимической инертности углеводороды не только плохо, но и не до конца будут «сгорать» в кислороде. Эксперименты показали, что опасения были слишком преувеличены.

Создан, например, топливный элемент, действующий на пропане, природном газе, керосине и бензине. Образующиеся газы не содержат ядовитых компонентов. А это — признак полного окисления. Коэффициент полезного действия тоже достаточно высок — 40—50 процентов, а мощности хватает для работы небольшого электродвигателя. Скажем еще, что пять лет назад применение в топливном элементе недорогих и доступных углеводородных топлив считалось невозможным и только в самое последнее время стало очевидно: низкотемпературное электрохимическое сжигание углеводородов хотя и трудноосуществимо, но вполне реально. Уже совершенно ясно, что, к примеру, в концентрированных растворах кислот при температурах 100—200 градусов метан или пропан — бутановая смесь — неплохое электрохимическое горючее. Углеводородные топли-

ва легко и хранить, и транспортировать. К этому можно добавить, что рабочая температура позволяет делать некоторые части элементов из дешевых пластмасс. Высокая стоимость низкотемпературных устройств объясняется лишь необходимостью применять в качестве катализатора хотя бы небольшое количество драгоценных металлов типа платины.

Разработка углеводородных элементов находится сегодня примерно в той же стадии, на какой были пять лет назад топливные элементы на водороде и кислороде, по-прежнему сохраняющие роль лидера.

ХИТРОУМНОЕ «СИТО»

Топливный элемент в отличие от обычного цинкового аккумулятора или батарейки карманного фонарика обладает, кроме прочих, еще такой особенностью: его «горючее» по мере траты легко возобновляется. Выходит, что при непрерывной подаче топлива и окислителя электрохимический генератор мог бы работать сколько угодно. Но беда в другом — в неумении создавать электроды нужного качества, то есть высокой активности.

Для таких электродов необходимы никель или металлы группы платины, их сплавы, угли с сильно «гофрированной» поверхностью, на которую наносятся катализаторы, и т. д. Да и одного каталически активного материала мало, надо еще знать и тайны изготовле-

ния из него высокоактивных электродов особой структуры.

Познакомимся с топливной батареей Ф. Т. Бэкона, одной из самых больших водородно-кислородных установок, построенной в 1960 году. Представьте замкнутую трубку, внутри которой циркулирует 27-процентный раствор щелочи. На одном участке трубки щелочь соприкасается с пористыми металлическими электродами: слева — водородными, справа кислородным. Газы, подаваемые к электродам, проникают сквозь поры трубок и вблизи внутренней поверхности вступают в реакции с электролитом. Ток течет, как и в описанной ранее принципиальной схеме, от водородного электрода через нагрузку (к примеру, электролампу) к кислородному. Коэффициент полезного действия этого простенького элемента достигает 55—60 процентов!

Такой удивительно высокий коэффициент полезного действия возможен лишь при сохранении в какой-то мере равновесных условий. На каждом из электродов все процессы должны идти с очень большой скоростью как в прямом, так и в обратном направлении или по электрохимической терминологии, на электродах должны быть большие токи обмена.

Обратим внимание на некоторые подробности. Начнем с того, что каждый электрод в элементе Бэкона — двухслойный, состоит из двух проницаемых никелевых «сит».

Электроды должны беспрепятственно

пропускать газы сквозь себя, но в то же время не позволять им ни в коем случае «пробулькивать» в электролит. Помимо того что утечка газа — бесполезные потери, кислород и водород еще и крайне строптивые соседи. Окажись они рядом, то есть начни «пробулькивать» в электролит, и никто не гарантирован от образования гремучей смеси и взрыва. Если бы электроды были без «секрета» — просто пористыми, — газы пробрались бы в электролит. А чтобы этого не было... пришлось пойти на хитрость: к электролиту обращен мелкопористый слой (диаметр ячейки всего около 20 микрон), к газу — слой как с мелкими, так и с крупными порами — ячейки примерно вдвое-втрое большего диаметра.

Сначала электроды смачиваются электролитом, потом, когда начинает вдуваться газ под высоким давлением (при 200 градусах, то есть при рабочей температуре элемента Бэкона, — оно не дает щелочи закипеть), электролит не выдерживает натиска и покидает мелкопористый слой. После вытеснения электролита мелкопористый слой вообще выбывает из игры, то есть в нем не протекает никаких реакций. Оставаясь абсолютно безучастным к работе электрода, он служит надежной диафрагмой, не пропускающей газ в жидкость.

А где «сгорает» водород? Попав в широкие поры (они, между прочим, лишь в три-четыре раза толще волоса), смоченные тонкой пленкой электролита, он адсорбируется на их

стенках. Здесь-то и «отторгаются» электроны у водородных атомов.

Казалось бы, чем больше широких пор, тем эффективнее электрод: ведь на стенках этих пор и протекает реакция. Но для того чтобы реакция фактически происходила, поверхность поры должна быть смочена пленкой электролита. А для этого поблизости должен находиться источник электролита — тонкие поры.

Часто говорят, что реакция происходит на трехфазной границе — там, где соприкасаются газ, жидкость и твердое тело. Мы остановились лишь на одном пункте, имеющем не только практический, но и теоретический аспект. На том, как влияет структура электрода на его активность. А вообще теория электродов весьма сложна. При ее разработке опираются на разнообразные физические и электрохимические методы измерений, сложный математический расчет, связанный с вычислительной техникой, на новейшие достижения металлокерамики и технологии пластмасс.

Эта глава началась разговором о долговечности. Теперь можно его продолжить. Та же батарея Бэкона, собранная из 40 элементов, имея скромные габариты (она не больше ведра), обеспечивает мощность 5 киловатт при напряжении 24 вольта, но... Да, к сожалению, по долговечности она все же сильно уступает, допустим, газовой турбине. Значит, создать высокоэффективный топливный эле-

мент — еще половина дела. Срок службы не менее важен. А причин, уменьшающих его, немало. Тут и снижение каталической активности («отравление») электродов, и коррозионные процессы, и другие, тому подобные сложности, огорчающие ученых и конструкторов, но не способные заставить их отступить.

К ВЫСОКИМ ТЕМПЕРАТУРАМ?

Распрощается ли автомобиль со своим «сердцем» — бензиновым двигателем? Вопрос этот заботит и жителей современных городов-гигантов и творцов новых автомашин. Одни не хотят вдыхать ядовитый перегар, другие одержимы духом исканий.

Разве не заманчиво оснастить легковые и (что реальнее) грузовые машины электродвигателями на основе топливного элемента?

Что и говорить, очень заманчиво, хотя удельная мощность его пока примерно втрое меньше, чем бензинового мотора. Отмечая минусы, вспомним и о безусловных плюсах: топливный элемент бесшумен, не выделяет никаких вредных газов. Вероятно, когда удастся освоить дешевое горючее и повысить удельную мощность, топливный элемент сможет составить конкуренцию «старичку» — двигателю внутреннего сгорания.

Сейчас самая пора свести две точки зрения. Обе принадлежат единомышленникам, но не совпадают. Сначала дадим слово поклонникам низкотемпературных топливных

элементов. «Взять электромобили или любой другой вид будущего транспорта, вплоть до космического,— говорят они.—Случись какая неисправность — и нужен ремонт прямо на шоссе или на борту космического корабля. Значит, установка должна легко собираться и разбираться. Поэтому совершенно очевидно, что предпочтение следует отдать топливным элементам, работающим почти при нормальных «комнатных» условиях. Тем более что за последнее время наметился отрадный сдвиг: «топить» теперь можно не только водородом, но и более дешевым топливом».

«Нет, вы ошибаетесь,— возражают сторонники другого взгляда,— топливные элементы, рассчитанные на высокие температуры, несравнимо перспективнее. Для них хорошо почти любое «горючее», начиная от окиси углерода и кончая нефтепродуктами. А ведь именно на них стоит ориентироваться, если рассчитывать увидеть топливные элементы в большой энергетике. И уж, конечно, не на топливо, требующее дорогостоящих катализаторов».

Кто же прав?

Было бы безнадежно пытаться дать определенный ответ. Правильнее сказать, что и то и другое имеет право на жизнь, необходимы оба типа топливного элемента. Интересно, что процессы в высокотемпературных топливных элементах при 500—1000 градусов Цельсия (говорить о «холодном» горении уже не приходится) по-прежнему принципиально отли-

чаются от «горячего» горения тем, что сразу же выделяется не тепловая, а электрическая энергия. Высокая температура — ускоритель электрохимических реакций.

Само собой разумеется, что в высокотемпературных топливных элементах неприменимы водные растворы электролита — вода сразу испарилась бы. Приходится применять расплавленные соли (чаще всего смеси углекислых солей натрия, калия, лития) и даже твердые электролиты (смеси окислов циркония и некоторых других металлов II и III групп периодической системы Менделеева). Такие установки уже созданы и показали свою работоспособность. Но из-за сильной коррозии материалов в расплавленных солях и недостаточной удельной мощности элемента (к тому же твердые электролиты растрескиваются) их долговечность пока еще оставляет желать лучшего.

Мы умышленно подчеркнули основные (есть и менее значительные) недостатки высокотемпературных топливных элементов. Их немало, но, когда говорят о будущем топливных элементов в большой энергетике, подразумевают тем не менее именно высокотемпературные электрохимические генераторы.

ПРОГНОЗЫ ОПТИМИСТИЧНЫ

В самом деле, реально ли на основе топливных элементов строительство крупных электростанций? На этот вопрос отвечают по-

разному, начиная от утверждения, что для большой энергетики топливные элементы непригодны, и кончая тем, что в относительно короткие сроки они обеспечат 20 процентов всего потребления электроэнергии в США. Предсказать истинную перспективу трудно, потому что неясна пока экономическая сторона вопроса.

В проектах и опытных образцах топливных элементов лежит такая идея: заставить водород или углерод — одним словом, чистое топливо — выделяться в порах электродов из каких-либо соединений. Еще соблазнительнее (мы об этом говорили) прямо вводить в элемент уголь, нефть или газ, а получать энергию и ценные химические отходы. Не требует особых пояснений, что чистый водород, который сейчас питает обычно низкотемпературные топливные элементы, для целей большой энергетики баснословно дорог.

Почти все виды природного топлива уже «продегустированы» реакциями «холодного», точнее — беспламенного горения. И лишь самое распространенное — твердый уголь — до сих пор не удалось «сжечь» в топливном элементе. Электрохимически он настолько инертен, что даже при 1000 градусах Цельсия непосредственно не отдает электронов. Зато уголь легко поддается газификации: при обработке углекислым газом он превращается в окись углерода (генераторный газ), с которым запросто разделываются топливные элементы.

Придется все же с коэффициента полезного действия, равного 65 процентам, кое-что сбросить на потери, связанные с газификацией. Правда, в высокотемпературных элементах часть тепла (выделяющегося за счет химической энергии), которая не превращается в электрическую, также может дать полезный эффект. И он тем больше, чем выше температура работы топливного элемента. Поэтому предположение, что потери, допустим, при подземной газификации (идея, выдвинутая еще Д. И. Менделеевым и по-новому засверкавшая в сочетании с топливным элементом) покроются, не лишено оснований. Следовательно, коэффициент полезного действия, равный 65 процентам,— не преувеличение.

Теперь давайте посмотрим: дóроги или нет материалы, из которых строятся топливные элементы, и каков срок их службы. Весьма приблизительные расчеты, выполненные английским исследователем, приводят к выводу: чтобы станция на топливных элементах была экономически выгодной (при названном высоком к.п.д.), нужно примерно в 3 раза повысить уже достигнутую удельную мощность топливных элементов и по крайней мере в 15 раз увеличить срок их жизни. Так как параметры топливных элементов улучшаются с каждым годом, можно надеяться: претензии к их удельной мощности будут удовлетворены в ближайшее время.

А вот как продлить срок службы?

Материалы, которые хорошо противостояли бы коррозии и сохраняли в то же время высокую прочность при работе высокотемпературных топливных элементов, найти нелегко. И тем не менее, пока среди всех новых методов выработки электроэнергии (их несколько), кроме топливных элементов лишь магнитогидродинамические генераторы позволяют уже получать мощности, пригодные для широкого использования. Электрохимики преуспели больше, чем создатели МГД-генераторов: долговечность низкотемпературных элементов измеряется уже годами, а высокотемпературных—месяцами. Многие крупные электрохимики и энергетики считают, что к 1970 году появятся опытные установки в сотни или даже тысячи киловатт, на которых можно будет уже более пристально исследовать экономику вопроса. Специалисты надеются, что в 1980 году будут построены установки мощностью в десятки тысяч киловатт. Правда, любые прогнозы ненадежны и наделены обычно солидным «запасом прочности». Но ведь не зря говорят: история науки и техники всегда работает на оптимистов!

В СОЮЗЕ С СОЛНЦЕМ

Каких-нибудь десять лет назад солнечную энергетику сравнивали с тщедушным младенцем, которого ученые пестовали в своих лабораториях за закрытыми дверями — не столько по соображениям секретности, сколь-

ко для защиты от юмористов. Сегодня это вполне здоровый, нормально развивающийся ребенок.

Еще на третьем искусственном спутнике Земли отправились впервые в космос советские фотоэлементы, превращавшие прямо в электричество энергию солнечных лучей. И сейчас велики заслуги полупроводниковых солнечных батарей как долговременных поставщиков энергии, необходимой спутникам и межпланетным станциям.

Интересно, что солнечные батареи выступают не одни, а дуэтом — с дополняющими их в периоды затемнения химическими источниками тока. Кстати, космос не единственное место, где союз солнце — электрохимия имеет хорошее настоящее и не менее обнадеживающее будущее. Рано или поздно пойдет речь не только о малых солнечных установках, но и о больших промышленных фотоэлектростанциях. И тогда топливные элементы станут просто незаменимыми для утилитарного использования солнечной энергии.

Научная мысль, спору нет, сделает все для того, чтобы солнце — поистине гигантская электростанция (даже двух процентов его энергии, падающей на сушу, хватило бы для удовлетворения всех потребностей человечества в энергии) — служило людям. Уже нынешние кремниевые батареи превращают около 15 процентов поглощаемой энергии в электрическую. В будущем их коэффициент

полезного действия возрастет, вероятно, в полтора-два раза. Но на ночь, когда солнечные батареи без работы, придется заранее запасать энергию, причем в огромных количествах. Каким же образом?

Искать выход с помощью обычных, хорошо известных аккумуляторов безнадежно, так как потребовались бы горы цветных металлов. Реален другой вариант. Найти для электроэнергии, поставляемой солнечными батареями, несколько неожиданную точку приложения — электролизер. В нем вода разлагается на кислород и водород. В дальнейшем газы, хранящиеся в газгольдерах, предлагается «сжигать» в водородно-кислородном топливном элементе.

Коэффициент полезного действия такой системы окажется наверняка заметно ниже, чем, например, свинцовых аккумуляторов. Но зато во сколько раз меньше (в расчете на одинаковый запас энергии) потребуется цветных металлов. И если думать о том, как лучше заставить работать солнце в энергетической упряжке, то содружество солнечная батарея — электролизер — топливный элемент — бесспорно самое лучшее из всего, что можно придумать. Единственное «нет» в этом проекте — дороговизна фотоэлектрических батарей, изготовляемых из ультрачистого кремния. Но ведь недавно и алюминий стоил дороже золота, а сейчас он не менее ходовой металл, чем железо. Наверняка подешевеет, и очень скоро, кремний и другие полупро-

водники. Тогда перед использованием солнечной энергии на основе топливных элементов зажжется зеленый светофор.

БАКТЕРИИ «ПОЖИРАЮТ» ЭЛЕКТРОНЫ

В клетках и в целых живых организмах происходит много таинственного и загадочного. Вероятно, это самые сложные химические системы, с которыми имеет дело человек. А между тем все эти процессы протекают удивительно слаженно и управляемо. И прямо скажем, есть чему поучиться у природы и химику-экспериментатору, и инженеру, и, конечно, электрохимику.

Если предположить, что преобразование энергии в мышцах человека совершается только за счет известных современной науке превращений химической энергии в механическую, то при напряженном труде мускулы у человека должны были бы прямо-таки кипеть. Однако температура здорового человека всегда постоянна. ...Тайна мышечного волокна до конца не раскрыта и сегодня. Но, по мнению многих ученых, в его работе немаловажную роль играют электрохимические процессы. Эта догадка подкрепляется единым выводом, к которому давно уже пришли биохимики и биофизики, что во всех проявлениях жизни так или иначе принимает участие электричество.

Хорошо, но какое все же отношение ко всему этому имеют топливные элементы?

Оказывается, не столь уж далекое, хотя то, о чем мы хотим рассказать, можно отнести к топливным элементам не совсем по праву. А впрочем... Впрочем, познакомьтесь прежде с коротеньким сообщением из английской газеты «Файнэншл таймс». Вот оно:

«Бактерия, «пожирающая» электроны, нашла неожиданное использование в топливном элементе, созданном для опытных целей. Элемент состоит из двух отделений, имеющих электроды, соединенные проводником. В одном отделении находятся сульфат железа и серная кислота. Бактерии содержатся в другом отделении, куда налит раствор кислоты в воде. Сульфат и кислота взаимодействуют друг с другом, высвобождая электроны, которые по проводнику направляются к электроду в отделении с бактериями, где и поглощаются ими. Для обеспечения бактерий кислородом предусмотрена продувка воздухом».

Изготовлена и еще одна топливная батарея, в которой электричество производится благодаря бактериям. Основные ее элементы — 12 пластмассовых контейнеров, размером с аптекарский пузырек, заполненных очень маленькими шариками из... риса. Они смешиваются с бактериями из семейства дрожжей или хлебной плесени и водой. В смеси происходит разложение — образуется электрический ток. Анодом и катодом в батарее служат соответственно медная и алюминиевая ленты.

Между прочим, мировой океан — тоже не что иное, как исполинских размеров топливный элемент. В придонном слое постоянно выделяется электроэнергия. Она — продукт реакции между всевозможными органическими остатками, непрерывно оседающими на дно, и «электролитом» — морской водой. Попытки воспроизвести этот процесс искусственно увенчались успехом. Отыскались даже живые организмы, ставшие своеобразными катализаторами реакции, имитировавшей то, что происходит в океанских глубинах. Конструкция такого биохимического топливного элемента чрезвычайно проста.

Обыкновенный аквариум с морской водой разделен надвое микропористой перегородкой. Ионы «прорываются» сквозь нее, жидкость — нет. С одной стороны — там, куда опущен анод, насыпано «топливо» — органический перегной, поднятый с морского дна (в нем же есть бактериальные клетки, ускоряющие электрохимическое «горение»), с другой, где катод,— нет ничего, кроме обычной морской воды, насыщенной кислородом. Даже не верится, что по внешней цепи может идти ток. Но подключим прибор, и он покажет: напряжение — один вольт. Неплохо, тем более если учесть, что топливо не стоит ни копейки, запасы его безграничны, а построить таких элементов можно сколько угодно — места надо не много.

Очевидно, в биоэлементах можно «сжигать» не только морской «перегной», но и лю-

бые органические отходы. Правда, мощности биологических топливных элементов мизерно малы, и сейчас трудно судить, найдут ли эти оригинальные преобразователи место под солнцем даже в малой энергетике будущего.

ЗА ОБЛАКАМИ И НА ЗЕМЛЕ

...Реактивный истребитель делал одну «горку» за другой. Пилот гонял сверхзвуковую машину по параболической кривой. Когда самолет строго придерживается ее, в нем создается кратковременная невесомость. Но вот машина приземлилась, летчик спрыгнул на бетонку, а с кресла во второй кабине, занимаемое обычно вторым пилотом, сняли металлический бак и осторожно понесли к автомобилю. Что это значит? Зачем невзрачный и вроде самый что ни на есть обыкновенный бак «катали» на невесомость?

Инженерам фирмы «Аллис-Чалмерс», по заданию которых и проводились эксперименты с топливными элементами в условиях невесомости, подобное не показалось странным. Топливный элемент готовился к полету в космос на одном из спутников США.

В том, что топливный элемент, еще не став как следует на ноги, сразу вырвался за облака, нет ничего удивительного. У него небольшой вес и габариты, кроме того, по сравнению с другими источниками энергии у топливного элемента не только повышен-

ная надежность, но и «геометрия», которая может быть любой — в зависимости от назначения. Единственные побочные продукты при работе на большинстве приемлемых топлив — вода и углекислый газ — легко удаляются. Излучение тепла очень невелико. В общем, топливный элемент создан словно специально для летательных аппаратов. Многие ведущие зарубежные специалисты считают, что он особенно подходит для космических кораблей, предназначенных для полетов, которые слишком длительны для обычных аккумуляторных батарей и недостаточно продолжительны для ядерных или других мощных источников электроснабжения.

Топливные элементы предполагается использовать прежде всего на пилотируемых кораблях. Так, водородно-кислородной топливной батареей фирмы «Дженерал электрик» был оснащен очередной корабль — спутник «Джеминай». Батарея обеспечила 14-дневное питание основных электрических систем корабля при полете его с двумя космонавтами на борту. Уже проведенные эксперименты показывают: батарея способна давать ток в течение более чем шести недель, что, к примеру, вполне достаточно для пяти рейсов к Луне и обратно.

На космодроме опробуется сейчас и система для корабля «Аполлон», который предполагается запустить с тремя космонавтами на борту в 1966 или 1967 году. Этот топлив-

ный элемент мощностью в 2 киловатта уже проработал больше 1500 часов в вакуумной камере, имитирующей условия полета к Луне.

Топливные элементы находят применение и в оборонной технике. Военные организации США пробуют электрохимические генераторы на скрытых полевых позициях, на радиолокаторных и передвижных радиостанциях. Встречается иногда и умышленная дезинформация. Так, несколько лет назад газеты облетело сенсационное сообщение об американском тягаче на топливных (пропановых) элементах. Публиковались даже фотоснимки с человеком за рулем. Но вскоре выяснилось: элемент поглощал не пропан, а чистейший водород, и двигался тягач всего 15 минут. Сейчас пресловутый тягач — музейный экспонат.

В 1964 году фирма «Аллис-Чалмерс» поставила 750-ваттный гидразинно-кислородный элемент для научно-исследовательской подводной лодки «Стар» с одним человеком на борту. Лодка, весом в одну тонну и длиной 2,7 метра, погружается на глубину 60 метров, имеет неплохую скорость. Топливный бак занимает площадь не большую, чем стул. Электроэнергия расходуется для двух находящихся вне корпуса электродвигателей, для освещения, поддержания жизнедеятельности оператора, для навигационных целей и связи. Лодка способна пробыть под водой 12 часов, после чего запасы кислорода и водорода пополняются.

Что же касается топливных элементов для наземных условий, то темпы их создания не назовешь быстрыми. Однако несомненно, что опыт, накапливаемый в ходе разработок электрохимических генераторов, для космоса и здесь сказывается благотворно. Усовершенствованный вариант топливного элемента Бэкона мощностью 500 ватт уже больше года работает на одной из газокомпрессорных станций. Одна из японских фирм опубликовала недавно описание водородно-кислородной батареи на 1000 ватт, установленной на вильчатом подъемнике. Доктор Фильштих (ФРГ) построил топливный элемент на системе «метанол-воздух» для речных сигнальных фонарей. В этом элементе — щелочный электролит. Но даже с учетом стоимости каустика он дешевле в эксплуатации, чем существующие пропановые светильники аналогичного назначения.

Где еще в ближайшие годы увидим мы топливные элементы?

Больше всего подходят они для сравнительно больших транспортных средств: локомотивов, автоподъемников, грузовых машин, внутризаводского транспорта, для подземных работ. Топливные элементы весьма перспективны и для освещения буев, на радиолокационных станциях, как вспомогательные источники тока для самолетов. Не исключено их применение и когда требуются небольшие количества электроэнергии: для бытовых нужд, в отдаленных районах и т. д.

Не стоит поэтому заранее ограничивать сферу использования топливных элементов. Ясно, что и сегодня она уже достаточно впечатляюща.

Сейчас в проблеме топливных элементов, переживающих бурное «второе рождение» и сулящих техническую революцию в целом ряде магистральных направлений техники, самым тесным образом объединены интересы электрохимиков, энергетиков, физиков, материаловедов. И мы вправе ожидать подлинных чудес от этой большой армии специалистов, сосредоточивших свои усилия на прямом преобразовании химической энергии в электричество.

НА „ТРОНЕ“... ХИМОТРОН



лектронные лампы, полупроводниковые приборы. Они выступают в главных «ролях» во многих диссертациях, научно-популярных и фантастических рассказах, повестях. Особенно

повезло первым из них. Об электронных лампах шутливо говорят: родились, мол, под счастливой звездой.

И это понятно — еще не так давно они составляли ядро всей электроники, «трудились» в радиоприемниках, телевизорах, наконец, вычислительных машинах.

Но в самые последние годы на помощь, а иногда и на смену электронным вакуумным лампам стали все чаще приходить устройства полупроводниковые. Эти миниатюрные устройства, выполненные из кристаллов германия, кремния и ряда других веществ, ныне верно несут службу во всех отраслях электроники, в промышленности и быту, с поразительной точностью работая здесь как усилители и выпрямители тока.

Соперники-полупроводники во многих отношениях превзошли электронные лампы — их размер и вес настолько мал, что по этим признакам устройства даже как-то неловко сравнивать с громоздкими лампами. Они почти не нагреваются, выносливы, а поэтому незаменимы там, где требуется сочетание подобных качеств.

Возьмем, например, современные вычислительные машины. Самые ранние действовали, как мы уже сказали, на основе обыкновенных электронных ламп. В каждой машине их насчитывалось десятки тысяч. Надо ли говорить, что машины эти по своим размерам были очень массивны. Но как только лампы заменили полупроводниковы-

ми элементами, размеры машин сразу резко уменьшились, конструкция их упростилась и благодаря этому скорость работы и надежность возросли.

Но в технике, увы, нет ничего безупречного, все имеет не только достоинства, но и недостатки. На первых порах успехи, связанные с применением полупроводников, казались настолько внушительными, что на их недостатки смотрели сквозь пальцы. Однако со временем, когда полупроводники прочно вошли в «быт» современной техники, их дефекты и слабые стороны, особенно дороговизна и трудность изготовления, все чаще стали бросаться в глаза. Нужно было искать для них если не замену, то во всяком случае дополнение.

Таким «дополнением» и явились совершенно новые электрохимические приборы, получившие название солионов, или электрохимических преобразователей.

Хотя научные принципы, на которых основаны эти приборы, разработаны уже довольно давно и, как читатель позднее убедится, ему в основном уже знакомы, практическое распространение они получили только в самые последние годы.

Что же представляет собой электрохимический прибор? Представьте себе стакан с электролитом, уменьшенный до размера с наперсток или даже ноготь большого пальца. В этот сосуд впаяно два электрода. Перед нами — миниатюрный электролизер. Ввиду

того что нам придется ток пропускать через него довольно длительное время, к его электродам и электролиту предъявляются особые требования. Во-первых, электроды не должны растворяться или как-либо изменяться в процессе пропускания тока. Подобрать такие электроды несложно, они давно известны в электрохимии. Ими служат электроды из платины или графита.

Во-вторых, в процессе электролиза ни в коем случае не должно происходить разложения воды или какие-либо другие процессы, связанные с выделением газов. Поэтому в качестве электролита чаще применяют водный раствор йодистого калия или кровяной соли (ферри- и фероцианида калия), словом, раствор, который содержит ионы, могущие находиться в двух состояниях с разным зарядом.

Пусть в растворе имеются двух- и трехзарядные положительные ионы железа. Соединим ячейку с источником тока и посмотрим, как в этом случае ток будет протекать через нее.

Как мы уже знаем, электрическому току придется дважды пройти через границу электрод—раствор и раствор—электрод. Первая часть этой операции представляет катодный процесс. Поступающие из внешней среды электроны, достигнув границы катода с раствором, тут же захватываются в «плен» трехзарядным ионом железа. При этом он сам претерпевает изменение, превращаясь

в двухзарядный ион. Этот ион и устремляется к противоположному электроду. Здесь он отдает электрон аноду, превращаясь снова в трехзарядный ион. Ион с бóльшей зарядностью возвращается обратно к катоду, а электрон движется по металлическому проводнику к источнику тока и оттуда — на катод, чтобы встретиться с трехвалентным ионом железа и повторить весь процесс сначала. Если электроды сделаны из инертных (нерастворяющихся) металлов, то прохождение тока через ячейку не изменяет ни состава раствора — в нем остается столько же двух- и трехзарядных ионов, сколько было в самом начале процесса,— ни самих электродов.

В каждый момент времени на катоде из трехзарядных ионов образуется столько же двухзарядных, сколько на аноде возникает двухзарядных ионов из трехзарядных. А теперь поменяем полюсы электролитической ячейки и сделаем катод анодом и наоборот. Сразу ток потечет в противоположном направлении, но никаких других изменений не произойдет. Таким образом, мы имеем дело с описанной уже ранее обратимой окислительно-восстановительной электролитической ячейкой.

Анод, катод, электрохимическая реакция... Вы спросите: а почему вы назвали эту ячейку химотроном и на каком-таком троне он восседает? Ответ на оба эти вопроса тесно связан с дальнейшим рассказом о разнооб-

разных и неожиданных применениях, которые получили описанные выше простые приборы.

ПАТ И ПАТАШОН

В двадцатых годах нашего века большой известностью пользовались два шведских киноартиста — Пат и Паташон, создавших серию остроумнейших образов. Комический эффект достигался ими прежде всего благодаря мастерскому использованию большой разницы в их росте.

Подобно этому, работая над созданием нового электрохимического диода, исследователи решили воспользоваться различающимися по своим размерам электродами. Здесь в роли Пата — большого электрода — выступает платиновая сетка или сетка из фольги в виде полого цилиндра. А меньший электрод — Паташон — это торец тонкой платиновой проволоки. Естественно, разность их площадей — огромна. Оба электрода введены в электролизер с водным раствором йодистого калия, к которому добавлено небольшое количество йода. А все это, в свою очередь, удобно разместилось в корпусе из химически стойкого материала — стекла или пластмассы.

На аноде отрицательно заряженные ионы йода будут свои электроны щедро отдавать электроду. Объяснение тому простое — ионов здесь много. У большого Пата — катода — обратная задача. Он должен поставлять элект-

роны молекулами йода, превращая их в отрицательные ионы. Хотя молекул йода мало, на широкой груди большого Пата все же найдется их достаточное количество. Поэтому «равновесие» возможно — сколько ионов в определенное время на аноде разрядится, столько же их возникнет на катоде. Мы, конечно, несколько упростили картину тех реакций, которые протекают в действительности и в которых участвуют ионы. Но скорость электрохимических реакций, протекающих на электродах, определяет величину проходящего через ячейку тока. Значит, в этом случае через ячейку пойдет довольно значительный ток.

А теперь поменяем электроды ролями. Как только Паташон преобразится в катод, его новой целью станет отдавать молекулам электроны, превращая их в ионы. Увы, дело у него теперь не клеится. Свободных молекул в растворе мало, а к тому же и площадь электрода тоже весьма незначительна. Нетрудно себе представить, к чему все это приведет — величина проходящего через ячейку тока уменьшится в сотни, а то и тысячи раз по сравнению с тем током, который пропускала ячейка до перемены местами анода и катода. Кстати, в электронике приспособление, пропускающее в одном направлении большой ток, а в обратном малый, носит название выпрямителя.

Электрохимические выпрямители, основанные на различии в размерах катода и ано-

да, находят все более широкое применение. Если включить такой выпрямитель в цепь переменного тока, он будет превращать его в ток, идущий в одном направлении.

Электрохимический выпрямитель отличается высокой чувствительностью, надежностью и весьма низкой стоимостью. Само собой разумеется, что электрохимические диоды не могут заменить собой мощные выпрямители. Однако и для них место «под солнцем» уже нашлось. Оказалось, что они отлично преобразуют переменные токи как раз в той области так называемых низких частот, в которой использование полупроводниковых выпрямителей неудобно и малоэффективно.

ВАШ НОВЫЙ ЗНАКОМЫЙ — ИНТЕГРАТОР

Кто из школьников-старшеклассников не наслышан о страшных интегралах, которые, якобы, доставляют студентам столько хлопот. Но проходит время, и уже на втором курсе страхи рассеиваются. Интеграл входит в «быт» будущего инженера, физика или химика как друг и помощник.

А знаете ли вы, что интегрировать умеют не только люди, но и приборы. Так, обыкновенный электрический счетчик тоже «почти» интегрирует. Он суммирует проходящее через него электричество, выдавая результат в виде набора выскакивающих цифр. Если прибор способен суммировать непрерывно даже самые маленькие слагаемые — перед

нами интегратор. Таким образом, этот прибор автоматически регистрирует количество электричества, протекающего через него за данное время.

Одна из разновидностей интеграторов — приборы электрохимические. В них количество прошедшего электричества фиксируется по различным изменениям, этим током вызываемым. Яснее всего это видно на примере одного из электрохимических интеграторов — концентрационном интеграторе.

Введем в знакомый нам электрохимический диод новый элемент — пористую перегородку, разделяющую прибор на две части. В процессе работы диода состав раствора, как мы уже знаем, не изменялся. Посмотрим, что нового внесет перегородка. Если размеры ее пор достаточно малы и ионам через них пробираться трудно, то у анода и катода быстро начнут скапливаться продукты соответствующих реакций. А это приведет, в свою очередь, к возрастанию их концентрации.

При подключении ячейки к источнику постоянного тока в каждой половине прибора будет происходить тем большее изменение концентрации продуктов, чем больше величина тока и чем дольше он пропускался.

ЦВЕТ И ПАМЯТЬ

Что общего между ними? Не торопитесь — лучший ответ это тот, который хорошо продуман.

Существует очень много окрашенных растворов. Кому, например, не известны ярко-голубой цвет медного купороса. Окрашивание тесно связано с распадением нейтральных молекул на ионы. Поэтому в разговорах на «лабораторном жаргоне» химики часто говорят — голубые ионы, фиолетовые ионы...

Наш старый знакомый раствор йода имеет коричневую окраску. Если в качестве электролита использовать раствор йодистого калия и йода, то в том отсеке прибора, где происходит накопление йода, цвет изменится. Чем больше здесь появится молекул йода, тем он станет темнее.

А как узнать, насколько он изменился? Для количественной оценки окраски растворов существуют специальные шкалы. Считывание их показаний позволяет определить, сколько электричества прошло через электрохимическую ячейку. Если бы нам понадобилось зафиксировать это количество, мы могли бы в определенный момент ток выключить. Тогда раствор, не изменяя окраски, сохранялся бы долгое время, напоминая нам о величине пропущенного тока. Вот вам и связь между цветом и памятью.

Описанный интегратор, или сумматор тока, — самый простой из всех электрохимических интеграторов. Более сложные конструкции выполняются в виде многоэлектродных приборов. Но даже самые сложные из них весьма просты в сравнении с интеграторами, основанными на других принципах действия.

Концентрационным интеграторам присущи многие достоинства — они весьма просты по своей конструкции, не нуждаются в специальных источниках тока, а значит, особенно ценны при производстве переносных приборов. В частности, диоды успешно применяются для измерения разности потенциалов «подземное сооружение — земля».

Ясно, что память химотрона не вечна. Со временем накопленная информация (записанная в виде цвета раствора) начинает теряться. «Потеря памяти» зависит от многих причин и в первую очередь от способности пористой перегородки препятствовать прохождению через нее ионов. Ионы хотя и медленно, но все же проходят через перегородку, и раствор теряет свою окраску. Чем тоньше перегородка, тем короче «память» прибора.

Конечно, можно утолщать и утолщать ее. Но тогда соответственно увеличивается и внутреннее сопротивление интегратора, а поэтому сужаются возможности его использования. Вот почему в каждом конкретном случае нужно подбирать такую «запруду», которая при допустимых потерях информации удовлетворяла бы требованиям, предъявляемым к параметрам ячейки.

Сравнительно недавно появился новый интегратор — тетрод. Конструктивно он самый сложный из своих «собратьев». В отличие от диода в нем размещены еще два дополнительных электрода. Таким образом, в сумме тет-

род «владеет» уже четырьмя различными электродами.

Дополнительные электроды уменьшают утечку ионов через «запруду», повышают точность отсчета и надежность работы прибора. Тетрод представляет элемент с самой длительной и точной памятью. Именно такую память заложили американские исследователи в счетно-решающие машины, которые производит одна из фирм в Далласе. Блок памяти машины объединяет 360 ячеек, а в свою очередь каждая из них содержит три электрохимических интегратора. Следовательно, блок памяти — это 1080 интеграторов, общая емкость памяти в этой машине превышает миллиард знаков.

Но только ли с цветом электролита связана память химотрона? Нет, химотроны многолики. И в этом сейчас вы убедитесь сами.

ДЛИНА И ПАМЯТЬ

Не удивляйтесь этому сопоставлению. На изменении размеров электродов основан принцип действия довольно большой группы химотронов. И здесь особенно наглядно можно увидеть, сколь велика и разнообразна семья химотронов.

Мы знаем, что электроды диода ни в коем случае не должны изменяться при прохождении электрического тока. Теперь же предложим вам познакомиться с химотронами, дей-

ствие которых основано как раз на обратном принципе — максимально возможном изменении электрода в процессе его работы.

Применим в качестве электродов легкорастворимый металл, а в качестве электролита — раствор соли этого же металла. Например, пусть растворимым металлом будет медь, а электролитом — раствор сернокислой меди. В процессе электролиза электроды начнут растворяться. А количество растворенной меди будет строго пропорционально прошедшему электричеству. Причем количество растворенной меди можно определить по изменению длины электрода. Каким образом? Для этого достаточно электрод выполнить в виде проволочки. Ее длина и явится мерилом пропущенного тока, так же как цвет раствора в концентрационных интеграторах.

Описанное простое устройство — куломер — широко применяется там, где не требуется большая точность измерений, но нужно иметь интегратор простой, выносливый, не чувствительный к вибрациям и малогабаритный.

Нередко в лабораториях рядом с куломером можно увидеть и ртутный электрохимический счетчик. Это — стеклянный, герметически закупоренный с обеих сторон капилляр, заполненный ртутью. Присмотритесь к ней внимательней: светлый пузырек разделил ртуть на две части. Стоит подключить ячейку к источнику тока, как этот пузырек придет в движение. А величина столбиков,

о которой с точностью до трех процентов можно следить по градулированной сетке, тут же покажет, сколько тока прошло через прибор.

ЕЩЕ ОДИН ХИМОТРОН — МИМИСТЕР

На этом же принципе — использовании изменяющихся электродов — основан и другой, очень важный химотрон, так называемый мимистер.

Как и в большинстве химотронов, в миниатюрной ячейке — два электрода. Правда, теперь они отличаются друг от друга не размерами своими, а другими признаками. Один из электродов — управляющий — выполнен из металла, который при пропускании тока растворяется. Это чаще всего медь. А другой электрод — считывающий. Он не вступает в химическое взаимодействие с электролитом, потому что изготовлен из инертного металла, например платины или графита, тонким слоем нанесенного на основу из какого-либо изоляционного материала.

Что же происходит при пропускании через ячейку электричества? Анод растворяется, поставляя ионы в раствор. Эти ионы осаживаются на катоде, образуя на нем пленку. При этом общее сопротивление микроячейки изменяется. Ведь сопротивление элемента цепи — электрода считывания — зависит от толщины наросшего на нем слоя растворяющегося металла. Толщина этого слоя пропор-

циональна количеству прошедшего электричества.

Современные методы электрических измерений позволяют очень точно определять электрические сопротивления и тем самым толщину осадка.

Обычно применяемые в электронных машинах элементы памяти сохраняют ее до тех пор, пока через них идет ток. Если ток выключен, скажем, для ремонта машины, память теряется.

Замечательной особенностью мимистера является то, что он «намертво» запоминает информацию. Даже после выключения тока толщина осадка не изменяется. Вот почему мимистеры незаменимы в качестве элементов долговременной памяти.

«ХАРАКТЕР» ПРОЗРАЧНОГО ЭЛЕКТРОДА

Прочитав этот заголовок, вы спросите: «Разве электрод бывает прозрачным?» Конечно, бывает. Такой прозрачный электрод устанавливают в интеграторах, показания которых зависят от того, насколько изменяется его прозрачность, а также прозрачность электролитов под воздействием электрического тока. Химотроны с прозрачными элементами нередко называют электрическими модуляторами света.

Общая беда при производстве всех модуляторов света — сложность создания прозрачного катода. Много сил и времени тра-

тится на изготовление тонких слоев металла или нанесение на стекло двуокиси олова, что, собственно, и составляет основу электрода. И еще — оптическая плотность устройства изменяется очень медленно. Но все это перекрывается многими важными достоинствами модуляторов света перед всеми другими химотронами. У них малый вес и габариты, отсутствуют движущие детали, они могут (даже при отключении управляющего счетчика и питания) долгое время сохранять информацию, надежны в работе.

Трудятся такие модуляторы в качестве регуляторов яркости и освещения в радиоэлектронике, автоматике, кибернетике. В последнее время они, в частности, находят все более широкое применение в люминесцентных устройствах. На основе этих химотронов изготавливаются очки, предохраняющие глаза от ослепления при яркой вспышке, используются они и как индикаторные панели.

Принцип действия большинства из них такой: на пути светового потока помещают прозрачный электрод, а затем ячейку подключают к источнику тока. И тогда, по мере осаждения металла на электроде, его оптическая плотность начинает изменяться. Проходящий через ячейку ток, как и в элементах управляемого электрохимического сопротивления, никакого изменения электролита не вызывает. Поэтому общий коэффициент поглощения ячейки зависит только от оптиче-

ской плотности прозрачного электрода.

С другим видом электрохимических модуляторов, у которых при прохождении тока через ячейку меняется окраска раствора, мы уже познакомились. Это, прежде всего, электрохимический интегратор с визуальным отсчетом. Но у него есть один очень существенный недостаток—низкая скорость изменения оптической плотности ячейки, связанная с медленностью протекания в растворе химических реакций.

Случается и так, что прохождение через ячейку тока нарушает обычную оптическую плотность как электролита, так и электрода. Примером такой ячейки может служить модулятор с двумя «прозрачными» инертными электродами, нанесенными на стекло в виде пленок. Электролитом служит обычно раствор йодистого калия.

Ток включен. И тотчас на катоде стал выделяться осадок серебра, а следовательно—меняться его оптическая плотность. В электрохимическом процессе изменилась плотность и самого электролита. Все это, несомненно, сказывается на коэффициенте поглощения ячейки. К сожалению, в работе этот модулятор не безукоризненный — порой осажденное на катоде серебро самопроизвольно растворяется в электролите.

Какому же из трех видов модуляторов света отдать «пальму первенства»? Мнение специалистов единодушно: химотрону с прозрачным электродом. Главное, нужно стре-

миться к тому, чтобы изменение оптической плотности совершалось при минимальных затратах электрической энергии.

КАК ИЗБАВИТЬСЯ ОТ «АХИЛЛЕСОВОЙ ПЯТЫ»?

«Ахиллесова пята» всех химотронов, с которыми мы успели уже познакомиться,— это несовершенство методов считывания их показаний. Будь это приращение веса или объема электрода, как в куломерах, изменение цвета или светопропускной способности ячейки, как в электрохимических интеграторах,— всегда считывание результатов доставляет немало хлопот.

Куда проще оно в так называемых дискретных твердофазных интеграторах. Здесь для считывания используется явление изменения потенциала электрода при изменении природы электрохимической реакции, происходящей на электроде. Непонятно?! Поясним этот принцип на таком примере. Пусть нам нужно определить точное количество металла, который нанесен на один из электродов, выполненный из другого металла. Прежде всего для этого поместим электрод в электрохимическую ячейку в качестве анода. А затем подключим ее к источнику тока.

Пока на аноде будет находиться слой нанесенного металла, его потенциал будет без изменения. Но вот он наконец весь перешел в раствор. И сразу же потенциал изменится. А количество растворенного металла, соглас-

по закону Фарадея, будет пропорционально величине тока, протекающего через ячейку.

Дискретные интеграторы позволяют точно определить момент, когда показания прибора достигнут какой-то заданной величины. А нужную величину несложно ввести в химотрон, осадив предварительно на анод определенное количество металла. Такие интеграторы — добрые помощники людей в управлении многими сложными производственными процессами.

ПОСЛУШНАЯ ЖИДКОСТЬ

Здесь пойдет рассказ еще об одной профессии химотронов, основанной на их большой чувствительности.

Все вы, наверное, слышали о датчиках. На обыденном языке датчик — это прибор, показания которого позволяют судить о каких-то изменениях, происходящих в изучаемой системе.

Например, обычный дифференциальный манометр — не что иное, как датчик изменения давления. Эти изменения регистрируются по положению стрелки манометра. Не секрет, что наиболее удобными датчиками являются датчики электрические. Ведь электрический ток заметить и зарегистрировать легче всего.

Для того чтобы стрелка манометра пришла в движение, необходимо значительное изменение давления. Стрелочный манометр — прибор грубый. А вот если бы всякое, хотя

бы и очень маленькое изменение давления создавало пусть тоже очень слабый электрический ток, его можно было бы легко заметить. Такой манометр был бы гораздо чувствительнее. Но как это сделать? Ясно, что между давлением и током нет прямой связи. Нужен какой-то промежуточный посредник, преобразующий давление в электрический ток.

Одним из таких посредников и может служить особой конструкции химотрон. Представим себе маленький цилиндр, крышки которого — чувствительные гибкие мембраны. Разделим цилиндр на две части непроницаемой перегородкой, где сделано узкое отверстие — тонкий канал, соединяющий обе части цилиндра. Заполним цилиндр жидкостью и слегка нажмем на чувствительную мембрану. Она вогнется и вытолкнет часть жидкости через канал в другую половину прибора. Втекающая жидкость в свою очередь выгнет наружу вторую мембрану. Прекратим нажим, и тогда выгнутая наружу упругая мембрана восстановит первоначальное положение, вытолкнув жидкость обратно.

Итак, изменение внешнего давления, связанное с изгибом мембраны, гонит жидкость по каналу. Но как заметить движение жидкости? Вот здесь можно воспользоваться упоминавшимся уже свойством электролитических ячеек — они превосходно могут «чувствовать» движение электролита. Пусть теперь наша жидкость будет электролитом.

Поместим три электрода в цилиндр — два больших в правую и левую его половины, а третий, крошечный,—в канал, их соединяющий. Последний электрод можно сделать, например, в виде тоненького колечка. Стенки цилиндра, разумеется, необходимо выполнить из изолирующего материала —пластмассы или стекла. Соединим электроды с источником тока так, чтобы большие электроды были анодами, а маленький — катодом. В системе появится ток.

Как и в выпрямляющем устройстве, вся игра идет на различии в площади анодов и катода. Количество электричества, которое протекает через систему за одну секунду, определяется количеством ионов, которые успевают за это время подойти и разрядиться на маленьком катоде. Как это (увы!) часто бывает и в жизни, слабейший партнер задерживает всю команду.

Ему нужно помочь доставить к его поверхности побольше ионов.

Движущийся раствор увлекает за собой ионы и несет их по каналу мимо катода. Чем быстрее это движение раствора, тем больше он переносит к катоду ионов. Следовательно, в системе пойдет ток, который будет возрастать в момент перетекания жидкости по каналу из одной половины прибора в другую. Ясно, чем давление на мембрану больше, тем больше она вытолкнет жидкости и тем больший ток потечет по цепи. Итак, с помощью мембраны мы преобразуем изменение давле-

ния в движение жидкости, а с помощью системы электродов преобразуем движение в ток.

Вот и весь принцип действия электрохимического датчика. Описанные датчики применяются, прежде всего, для регистрации колебаний давления. Такие датчики просты по конструкции и чрезвычайно чувствительны.

Но описанный электрохимический датчик с упругими крышками — мембранами может быть использован и в качестве датчика другой механической величины — ускорения.

Измерять ускорения — задача важная и трудная. В современной технике необходимо уметь замечать и регистрировать в равной мере ускорения и большие и малые. Нужно знать ускорения, которые испытывает самолет и ракета, автомобиль и корабль. Нужно уметь измерять ускорения колеблющихся (вибрирующих) тел. Вибрация — важнейший процесс (а иногда и страшная угроза) в современной технике. Вибрируют и крылья самолетов, и валы турбин, и многие-многие части разнообразных машин.

Существует много разнообразных приборов — датчиков ускорений (именуемые часто аксельрометрами и виброметрами). Но вряд ли среди них есть более простые, чем электрохимические. И один из них — обычный электрохимический датчик с упругими стенками. Допустим, что стенки датчика внезапно пришли в движение — им сообщили ускоре-

ние. При этом жидкость, заполняющая датчики, по закону инерции Ньютона, старается сохранить состояние покоя. В момент ускорения жесткие стенки цилиндра придут в движение, а жидкость останется неподвижной. Иными словами, стенки прибора будут некоторое время двигаться мимо жидкости. Но с точки зрения маленького катода все равно — он ли движется мимо жидкости или жидкость движется мимо него. Лишь бы мимо его поверхности проходило больше ионов. Поэтому внезапное ускорение создает в электрохимическом датчике кратковременный импульс тока. Когда же энергия жидкости будет преодолена и она начнет двигаться вместе со стенками, ток прекратится.

На том же принципе работает прибор, когда он выступает и в роли датчика вибраций. Если заставить прибор совершать колебания вместе с вибрирующим телом, он будет давать импульсы тока при изменении направления движения.

В небольшой книге невозможно, разумеется, описать все разработанные в настоящее время конструкции электрохимических датчиков механических величин — давления, ускорения, вибраций, датчиков прикосновения, пульсомеров, гидрофонов, фонографов и т. д. и т. п. Однако для того чтобы читатель все же смог в известной степени представить себе все разнообразие этих приборов, опишем хотя бы один из них, построенный на совершенно другом принципе.

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ НАСОС

Мы знаем, что частицы твердого тела, переходя в раствор, нередко превращаются в заряженные ионы. Так, при растворении металла в кислоте его атомы могут переходить в раствор в виде положительных ионов (катионов), оставляя на металле электроны — отрицательный заряд. Возникающее при этом разделении зарядов электрическое поле не позволяет положительным ионам уходить от электрода. В состоянии равновесия, когда ток не идет, ионы, перешедшие в раствор, частично группируются у поверхности металла.

В рассматриваемом случае на поверхности металла находится отрицательный заряд, образованный избытком электронов. Тогда в очень тонком слое раствора, прилегающем к поверхности, появится образованный ионами положительный заряд. Это так называемый двойной электрический слой. Причем такой слой не является отличительным признаком границы металл — раствор. Он имеется также и на границе раздела раствора и неметалла. Его толщина ничтожно мала, составляет от двух-трех до нескольких тысяч молекулярных расстояний. Зато электрические поля здесь огромны. Доходят они до нескольких десятков миллионов вольт на сантиметр. Не удивительно, что такие мощные поля могут влиять на течение химических процессов.

Но сейчас нас интересует другая сторона

дела. Мощное электрическое поле мешает ионам уйти от поверхности твердого тела в глубь раствора. Однако оно совершенно не препятствует их перемещению вдоль самой поверхности. Если заставить жидкость двигаться вдоль поверхности, то при этом она будет беспрепятственно увлекать с собой ионы. Таким образом, движение жидкости вдоль поверхности представляет собой замечательное явление движения заряженной жидкости. Хотя доля объема заряженной жидкости ничтожна — она пропорциональна толщине двойного слоя, тогда как двигается весь объем жидкости,— унос зарядов имеет большое значение.

Понятно, что если жидкость течет в очень тонком капилляре, то здесь почти весь объем ее приходится на заряженную часть. Унос зарядов приводит к образованию разности потенциалов на концах капилляра. Это явление получило название потенциала протекания.

Можно заставить ионы двигаться в двойном слое и другим способом. Наложим на капилляр электрическое поле. Хотя в сравнении с полем двойного слоя оно и незначительно, тем не менее ему хватит «силы» перемещать ионы вдоль поверхности капилляра. Но ведь они будут двигаться не одни — за собой в двойном слое потянут жидкость. Таким образом, слабое поле в направлении и вдоль оси капилляра будет непрерывно выкачивать из него жидкость. Это явление, обратное потенциалу протекания,— электроосмос.

Электроосмос и потенциал протекания представляют собой частные случаи так называемых электрокинетических явлений, играющих важную роль в электрохимии и коллоидной химии, в ряде биофизических явлений. Электроосмос можно использовать для преобразования электрических сигналов в механические, потенциалы течения — для обратной цели. На этих электрокинетических явлениях основана большая группа химотронов очень разных по конструкции и назначению.

В виде примера познакомимся с электроосмотическим насосом. В корпусе, заполненном электролитом,—два металлических электрода. Между ними помещается мелкопористая перегородка. Поры в этой перегородке и являются теми тонкими капиллярами, о которых шла речь выше. При подключении ячейки к источнику электрического напряжения жидкость вместе с ионами начнет перекачиваться сквозь перегородку. Понятно, что скорость перекачки полностью зависит от напряжения, подаваемого на электроды, а также свойств перегородки.

В зависимости от назначения химотрона его камера может быть ограничена гибкими мембранами или выполнена в виде замкнутой системы. При первом варианте развиваемые микронасосом усилия передаются с помощью мембран на вторичные устройства: оптические или гидравлические заслонки, механические счетные устройства, электрические

контакты. Такой насос используется как генератор колебаний.

Когда же микронасос — замкнутая система, концы камеры соединяются капилляром, а в нем помещено и передвигается вместе с жидкостью инородное тело — пузырек газа, ртуть. Положение инородного тела зависит от количества пропущенного через ячейку электричества и надолго сохраняется после исчезновения входного напряжения. Следовательно, в отличие от первого второй прибор обладает интегрирующим свойством. Работая под напряжением всего в 10 вольт, микронасос способен так «накачать» одну из камер, что в ней давление составит метр водяного столба, из камеры в камеру каждые десять секунд будет переходить кубический сантиметр жидкости.

Конечно, из химотрона землесосный снаряд не получится. Да это и ни к чему. Он предназначен для более тонкой работы.

БЕЗ ТРАНЗИСТОРА И ЛАМП

А теперь попробуем провести небольшой эксперимент. В нашем арсенале имеются электроосмотический насос и химотронный индикатор. Действия каждого из них уже подробно описывались. Но это «каждого в отдельности». Сейчас же попробуем присоединить индикатор к насосу, да так, чтобы у них оказалась общая мембрана. А затем подадим на клеммы насоса электрический сигнал.

Что же тогда произойдет? Поначалу в камере, где помещена мембрана, на немного вырастет давление. Это потому, что в нее перекачается под действием сигнала какая-то часть воды.

Но к «происшествию» не останется безучастным и индикатор, способный улавливать малейшие колебания мембраны. Какая-то часть электролита в нем протечет сквозь кольцевой катод. А на выходе прибора появится сигнал, превосходящий начальный, входной, в сотни раз.

Надо ли разъяснять огромное значение прибора? Ведь это настоящий усилитель, усилитель без ламп, транзисторов и прочей электроники, пригодный для радиосхем. Небольшой по размеру, простой в обращении, он может десятилетиями действовать непрерывно.

СОПЕРНИКИ ИЛИ ДРУЗЬЯ?

Вот и подходит к концу повесть о химотронах—наших верных помощниках. Семья этих электрохимических устройств, как видите, немалая и день ото дня пополняется все новыми членами. Что ж, каждому из них найдется применение в промышленности и науке. Конечно, нам удалось рассказать только о самых основных химотронах. Всем им присуща простота конструкции, миниатюрность и что не менее важно — изготовление их стоит сравнительно недорого.

На «троне»... химотрон. Вы можете спросить: «Не вытеснят ли электрохимические ячейки со временем полупроводниковые приборы?» Вспомним недавнее прошлое, когда появились первые полупроводниковые диоды и триоды. Кое-кто тогда предсказывал быстрый конец радиолампам. А сегодня даже не думают снимать их с конвейера, хотя полупроводники выпускаются во все большем количестве и быстро совершенствуются. В разных устройствах — разные элементы.

История повторяется. Только теперь ее «герои»—полупроводники и химотроны. Нет, электрохимические ячейки совсем не собираются вытеснять лампы и транзисторы хотя бы потому, что действуют они гораздо медленнее.

А вот и ответ на вопрос: там, где требуются миллионы операций в секунду, частота, исчисляемая в мегагерцах,—поле деятельности для электроники. Зато схемы, где нет высоких частот, всякого рода датчики, устройства долговременной памяти — это и есть своеобразный «трон» для химотрона. Не нужно забывать, что для питания электрохимических ячеек требуется в десятки раз меньше электроэнергии, чем полупроводникам, которые еще недавно славились своим скромным электрическим «аппетитом».

НОВЫЕ ПРОФЕССИИ НАУКИ



Открытие открытию рознь. Одни из них довольно быстро уходят в область преданий, «затмеваются» результатами новых исследований, другие — живут долгие годы. К числу последних по

праву относится и открытие, совершенное на рубеже XIX века известным химиком Т. Дэви. Оно произвело в ученом мире настоящую сенсацию. Смысл его заключается в том, что, пропуская ток через расплавы щелочей, Дэви выделил из них натрий и калий. Прежде получить эти чистые металлы никому не удавалось. Решить проблему помогла электрохимия.

Однако в те годы это замечательное открытие не могло быть использовано для получения новых веществ в больших масштабах. Ведь для ведения электролиза требуется много электроэнергии. А где ее было взять, если в 1913 году все станции царской России производили лишь 1,9 миллиарда киловатт-часов энергии в год?

Ныне дело иное. Например, только за один 1965 год в Советском Союзе было произведено более 500 миллиардов киловатт-часов энергии. И немая часть ее идет на нужды электрометаллургии — получения металлов с помощью электрохимии. Многие тысячи тонн алюминия, щелочей, хлора получаются этим путем. Собственно, рассказ об электрометаллургии следовало начать именно с производства «серебра из глины» — алюминия.

Оглянитесь вокруг себя и вы увидите десятки, сотни самых различных изделий из алюминия. Высоко в небе гудит самолет — он почти на две трети состоит из этого металла и его сплавов. Даже авиационный мотор, казалось бы, сплошь стальной, насчитывает

25 процентов легких и прочных алюминиевых узлов и деталей. Нет, не зря алюминий окрестили крылатым металлом.

И на земле «серебро из глины» пользуется очень большим спросом. Вы попали на какое-то крупное предприятие. Установленные здесь машины развивают сотни тысяч оборотов в минуту. И при этом, конечно же, появляются огромные центробежные силы. Эти силы зависят от веса деталей: чем они тяжелее, тем силы больше. Случается, что детали из стали не выдерживают возникающих напряжений и разлетаются на куски. Вот почему при изготовлении быстро вращающихся деталей наиболее эффективны сплавы из алюминия с медью. Они втрое легче стали и не уступают ей по прочности.

А загляните на обычную домашнюю кухню. И опять-таки здесь вы столкнетесь с самыми различными легкими предметами из алюминия: кастрюлями, чашками, ложками.

Но прочностью и легкостью далеко не ограничиваются замечательные качества серебристого металла—он не боится разрушающего действия большинства сильных кислот, хорошо проводит электрический ток и теплоту, позволяет прокатывать тончайшие листы. Благодаря всему этому алюминий стал одним из самых главных металлов в судостроении и приборостроении, на железнодорожном транспорте и в строительстве.

Серебристого металла требуется все боль-

ше. Но как «достать» его? Ведь в природе он не встречается в чистом виде. Не потому ли еще в середине прошлого века его относили к числу наиболее дорогих металлов? Тогда парижские модницы с удовольствием носили различные изящные безделушки из алюминия.

На долю «серебра из глины» приходится значительная часть общей массы встречающихся в земной коре металлов. И находится он, можно сказать, повсюду. Но беда в том, что добыть его очень трудно. Недаром алюминий прозвали «компанейским металлом». Он абсолютно не терпит одиночества, встречается лишь в различных соединениях с другими элементами. Это всевозможные сорта глин, содержащие много окиси алюминия, бокситы, «ледяной камень» — криолит и даже драгоценные минералы — красный рубин и голубой сапфир.

Как же избавить серебристый металл от всех его попутчиков? Тут-то металлургам и «протягивает руку» электрохимия. Ее задача — с минимальными затратами и максимальной быстротой извлекать алюминий из бокситов и нефелина. К наиболее сложной части этого процесса не без основания относят получение чистых исходных веществ. Действительно, отделить окись алюминия от двуокиси кремния очень непросто, при этом проделываются десятки сложнейших химических операций.

...Совершим небольшую прогулку по пред-

приятию, где рождается алюминий. Позади осталась проходная, но нигде не видно огромных огнедышащих домн, крутобоких кауперов и газгольдеров. Только куда ни глянь — воздух расчертило бесчисленное количество линий электропередач, упирающихся в светлые корпуса цехов. По существу, это даже не завод, а огромный комбинат, связывающий воедино целый комплекс различных производств. На одном из них бокситы или нефелин перерабатываются в окись алюминия, на другом — изготавливается искусственный криолит, на третьем — производятся угольные электроды, потребные для выплавки металла, и только на четвертом производстве совершается сама выплавка.

Получают чистую окись алюминия мокрым щелочным методом (есть также сухие щелочные и несколько кислотных способов). Бокситы поначалу помещают во вращающуюся печь, где они освобождаются от воды. Затем путь их лежит на шаровую мельницу — здесь они измельчаются до тонкого порошка. Но порошок с примесями. И на подмогу призывают едкий натр. После обработки им образуется растворимое соединение — алюминат натрия. Остается получить гидроокись алюминия, что и осуществляется в гидролизном аппарате.

Чтобы описать весь этот процесс, потребовалось лишь несколько строк, а длится он целых 100—120 часов.

А что происходит потом с гидроокисью?

Во вращающихся печах при температуре 1200 градусов по Цельсию осадок ее отделяется и обезвоживается. И вот уже чистая окись алюминия готова.

Наступает самый интересный этап — получение металлического алюминия из окиси. Протекает этот процесс в специальных огромных ваннах, выложенных изнутри огнеупорным кирпичом и угольными плитами.

Для электролиза окись алюминия надо было бы расплавить. Но кто не знает, что глинозем плавится только при очень высокой температуре. Поэтому электрохимики нашли обходный путь — они предложили окись алюминия предварительно растворять в расплавленном криолите — минерале из группы фторидов,— который сам плавится при более низких температурах.

Электролитический процесс в этом криолито-глиноземном расплаве начинается при подведении к ванне мощного тока. Под его воздействием и при высокой температуре окись алюминия разлагается на положительно заряженный ион алюминия и отрицательно заряженный ион кислорода. Потом ион кислорода пробирается к положительному электроду — аноду, отдает ему свои электроды и становится свободным газом. А уголь анода, соединяясь с кислородом, постепенно сгорает. В это же время на катоде — на дне ванны — идет непрерывное выделение расплавленного алюминия. Остается добавить,

что одна современная ванна дает ежесуточно сотни килограммов серебристого металла.

Алюминий из руды извлечен. Но в нем содержится значительное количество всевозможных примесей: уголь от анода, частички железа, натрия, кальция, попавшие из бокситов. Примеси ухудшают качество металла, делают его непрочным. От них, конечно, надо избавиться. И вновь хорошую услугу оказывает химия. Жидкий металл можно очистить, продувая хлором. Получаются пары хлористого алюминия. Потом эти пары поглощаются различными неметаллическими примесями. Всплывая с парами на поверхность ванны, они увлекают за собой и растворенные в металле газы. Образуется шлак, от которого не трудно избавиться.

В одном из цехов можно наблюдать, как очищенный алюминий разливают в формы. Если он предназначен для литья — на этом очистка и заканчивается, если же он пойдет на листы и проволоку — его переплавляют еще раз, делают более чистым.

Дважды очищенный, или, как его еще называют, рафинированный, алюминий содержит не более трех десятых процента примесей.

У серебристого металла такой чистоты особенно наглядно проявляются его благородные качества. Он очень пластичен, поддается прокатке в лист, не превышающий по толщине папиросную бумагу, его можно вытянуть и в проволоку-паутинку.

...Но алюминий лишь один, хотя и очень ценный, из металлов, получаемых электрохимическим путем. А между тем электрохимию можно использовать при производстве большинства элементов периодической системы Д. И. Менделеева. Кроме того, в металлургии все шире внедряется электрохимическая очистка — рафинирование цветных и редких металлов. Наряду с алюминием такой очистке подвергаются, например, и свыше девяти десятых выплавляемой во всем мире меди. Процесс этот протекает так: в сосуд с серной кислотой опускают сильно загрязненный различными примесями слиток меди — это анод. А катодом служит тонкий лист чистой меди.

При подключении электрохимической ячейки к источнику тока медь из слитка начнет переходить в виде ионов в раствор, а на катоде она будет выделяться в виде металла. Пройдет некоторое время и вся медь перейдет с анода на катод. А что станет с примесями? Почти все они либо растворятся в электролите, либо выпадут в осадок.

Полученная таким путем медь отвечает самым жестким требованиям промышленности. Много ценного таит в себе и выпадающий в осадок шлак. Из него добывают золото, селен, платину и многие другие металлы.

Сходный электрохимический процесс происходит и при производстве титана — металла, обладающего многими замечательными свойствами. Титан не окисляется при обыч-

ной температуре, не уступая в этом нержавеющей стали. В то же время он гораздо прочнее ее и в два раза легче. Подсчитано, что, если титан применить в авиастроении, появится возможность снизить вес самолета примерно на 600 килограммов. А стойкость этого металла против кислот и щелочей приближает его к платине.

Однако до недавнего времени производство титана доставляло немало трудностей. Почти 120 лет не могли получить его в чистом виде. Титан включали даже в число редких металлов. А между тем в земной коре его в миллионы раз больше, чем платины, ртути, серебра, в тысячу раз больше, чем никеля, в десятки раз больше, чем меди, цинка. И все же, если бы не электрохимия, кто знает, до каких пор титан по-прежнему относили бы к редким металлам.

Неоценимую помощь электрохимия оказала и производству хлора и щелочей. Эти продукты электролиза поваренной соли находят применение в целом ряде отраслей промышленности — при производстве пластмасс, хлорной извести, соляной кислоты, хлорвинила и многого другого. Без щелочи не обойтись и при изготовлении таких совершенно несхожих изделий, как мыло и искусственный шелк.

Невозможно перечислить все области науки и техники, связанные с электрохимическим синтезом. Он — верный подручный при производстве бумаги, тяжелой воды, все-

возможных новых высокоэффективных окислителей, а также различных изделий из пластмасс.

К сожалению, нередко они доставляют нам немало огорчений. Превосходная с виду вещь через несколько месяцев начинает быстро терять свой вид, на ней появляются трещины, она делается хрупкой и, наконец, совсем разваливается. Зачастую это объясняется недостаточной чистотой исходных продуктов — мономеров.

Но если мономер избавить от посторонних примесей, что с успехом делает электрохимия, это приведет к разительным улучшениям технологических и эксплуатационных свойств конечных продуктов — пластмасс. Они станут красивыми и долговечными.

Чистота сырья вообще становится все более решающим условием надежности и эффективности различных изделий.

ОСОБО ЧИСТЫЕ

Еще полвека назад ученые и не думали о чистоте химических веществ. Да и сама чистота — понятие весьма относительное.

Так, раньше металлурги мирились с примесями в сплавах даже в размере 0,01 процента. Теперь же их устраивают лишь миллионные доли процента. Уже ничтожная примесь тяжелых металлов вроде висмута или сурьмы, как оказалось, резко снижает жаропрочность сплавов. Если бы полупроводники,

люминофоры, квантовый генератор или топливный элемент изготовить из считавшихся когда-то «чистыми» материалов, то наверняка они бы не работали. «Привередливость» современной техники дошла до того, что иногда химическим соединениям разрешают иметь примесей не более одного атома на 100 миллионов атомов основного вещества. Такие требования, в частности, предъявляются и к полупроводникам.

Электроника оперирует ныне микродеталями, которые, к примеру, в 2500 раз тоньше человеческого волоса! Для подобной крохи, миниатюрной даже в сравнении с микробом, понятно, и пылинка глыбой кажется. Вот эта, прямо скажем, «сверхъестественная» чистота материалов и есть главное. Лишь благодаря ей полупроводники проявляют свои замечательные качества.

Но ведь в исходном сырье для получения того же кремния содержится 30—40 различных примесей: фосфора, цинка, меди, железа. А значит, на завод это сырье поступает в виде сложного соединения, которое, с точки зрения ультрачистой металлургии, является недопустимо грязным. Освобождается кремний от примесей в процессе химических реакций...

Все вы, наверное, слышали о лазерах — квантовых генераторах. Их частенько сравнивают с гиперболоидом инженера Гарина. Сфокусированный луч лазера может быть виден невооруженным глазом на астрономи-

ческом расстоянии — 9 000 000 000 000 километров. Однако такой сверхмощный поток он будет испускать только в том случае, если на изготовление лазера пойдут высочайшей чистоты трехокись алюминия, двуокись титана, фторит и вольфримат кальция.

В атомной промышленности степень очистки материалов расцепляющихся и конструкционных тоже должна быть высокой. Деление ядер урана может совсем прекратиться, если он будет содержать даже очень небольшое количество примесей редкоземельных элементов: гадолиния, самария и других. Присутствие стомиллионных долей бора или гафния в металлическом цирконии делает этот важный материал совершенно непригодным для использования в конструировании атомных реакторов.

В чистых материалах нуждается авиационная промышленность. Без них нельзя создать солнечные батареи для искусственных спутников Земли, кибернетические машины и плазменные генераторы электрического тока. Без достаточно чистых реактивов невозможны многие научные исследования.

Но получить высокочистое вещество — это, как говорится, еще полдела. Не менее важно уметь неопровержимо доказать его чистоту.

Большой раздел электрохимии, называемый полярографией, посвящен в значительной мере развитию очень точных методов химического анализа растворов. Принцип действия предназначенных для этого приборов —

полярографов, заключается в следующем: пусть в растворе содержатся ионы или молекулы различных неизвестных нам веществ и притом в разных также неизвестных количествах. Расшифровать состав этого раствора, определить все неизвестные — задача не из легких. Но справиться с нею можно.

Прежде всего исследуемый раствор зальем в электролитическую ячейку, к которой приложим некоторую разность потенциалов. Кстати, пока еще не упоминалось об очень важном обстоятельстве. Если электрод выполнен из металла, ионы которого имеются в растворе, например если медный электрод помещен в раствор медного купороса, то при наложении как угодно малой разности потенциалов на ячейку в ней потечет ток. Увеличивая разность потенциалов, мы будем увеличивать идущий ток. Однако и в этом отличие раствора от металлического проводника, возрастание тока с увеличением приложенного напряжения не будет продолжаться непрерывно.

Ионы в растворе движутся медленно. Однако при большой разности потенциалов, когда электродная реакция идет очень быстро, возникнет их нехватка. Подобно тому, как доставка топлива к мощной печи определяет скорость его сгорания, идущий через ячейку ток определяется скоростью доставки ионов к электроду.

Электрохимики уже давно научились поставлять ионы к электродам, энергично раз-

мешивая раствор. Однако текущий при этом ток будет зависеть не от того, какая разность потенциалов наложена на ячейку, а от быстроты доставки ионов движущимся раствором. На кривой зависимости тока от напряжения возникает характерное плато.

И теперь увеличение напряжения больше не сопровождается ростом тока, достигшего своего предельного значения. Величина этого предельного тока тем выше, чем больше концентрация раствора. Сейчас теория позволяет рассчитать точную связь между текущим током и количеством ионов в кубическом сантиметре раствора. Таким образом, измеряя ток, можно найти неизвестную величину — количество ионов данного сорта. А что произойдет в случае, когда электрод и ион имеют разную химическую природу, когда, например, электродом служит ртуть, а в растворе имеются ионы меди и цинка. Оказывается, ионам на чужом электроде разрядиться гораздо труднее, чем на своем. В этом им нужно помочь, наложив достаточно сильное электрическое поле. А значит, ток потечет через ячейку не при любом напряжении, а при напряжении, превышающем некоторую характерную и тоже известную для данной пары — ион и электрод — величину.

Кривая зависимости тока от напряжения в растворе сложного состава имеет вид ступенчатой кривой. Начало ступеньки — характерная для данного сорта иона разность потенциалов, высота зависит от количества

имеющихся ионов данного сорта. Измерение всей кривой позволяет определить и количество и природу имеющихся в растворе ионов.

Еще одна, последняя, деталь — электрод обычно представляет собой ртутную каплю. Это делается для того, чтобы поверхность непрерывно обновлялась и не загрязнялась выделяющимися продуктами электролиза. Таков принцип действия полярографа, изобретенного чехословацким ученым Гейровским, за что ему была присуждена Нобелевская премия. Этот прибор позволяет проводить анализ с точностью, не уступающей точности спектрографического анализа.

Простота полярографов обеспечила им широчайшее распространение во всех областях науки и техники, всюду, где требуются аналитические измерения.

Ценные результаты дает, например, и такой высокочувствительный метод анализа чистоты, как использование для этой цели радиоактивного излучения. Если исследуемый образец подвергнуть прямому облучению нейтронами, дейтронами или протонами, он перейдет в радиоактивную форму. Образовавшееся при этом количество радиоактивных атомов прямо процорционально концентрации определяемого элемента. Измеряя после облучения активность образца, определяют содержание пробы примесей.

Еще более чувствителен масс-спектрометрический метод. С его помощью можно разобраться даже в сложной смеси изотопов,

что не под силу никакому другому методу.

...Сегодня наука и техника выдвигают вопрос об «абсолютно чистом» веществе. До каких пределов можно будет довести его чистоту — покажет будущее.

ИСКУСНЫЙ ВАЯТЕЛЬ

Когда-то у составителей кроссвордов был коронный вопрос: «Как были изготовлены бронзовые кони, украшающие фронтон Большого театра в Москве?». Отвечали на него обычно правильно — с помощью гальванопластики. Возможность получения в электролитической ванне металлических изделий любой формы открыл в 1836 году академик Борис Семенович Якоби. Ученый пропускал через гальваническую ванну ток от постороннего источника. Под действием его металл положительного электрода — анода, — предназначенный для обработки изделия, мало-помалу переходил в раствор. Процесс этот называется анодным растворением.

Ионы растворившегося металла двигались по электролитному «морю» к отрицательному электроду — катоду,— где разряжались, превращаясь в нейтральные молекулы, и покрывали катод плотной пленкой. На поверхности катода появлялось покрытие из другого металла, принимавшее, естественно, ту геометрическую форму, которую имел катод. Этот процесс образования электролитических покрытий получил название гальванопластики.

Нанесение электролитических покрытий получило широчайшее распространение в промышленности. Кому не известны, например, хромирование или никелирование. Но не все знают, что нанесение тонкого слоя хрома или никеля производится именно описанным методом.

ЭЛЕКТРОХИМИЯ ОБРАБАТЫВАЕТ МЕТАЛЛЫ

Электрохимические методы обработки поверхности металлов, получающие все более широкое распространение, основаны в принципе на использовании только что описанного процесса анодного растворения.

Допустим, что мы с помощью анодного растворения захотели бы получить металлическое изделие с произвольно-сложной формой поверхности. Поместим в электролитическую ячейку анод — заготовку, из которой мы хотим получить изделие и обрабатывающий ее «резец». При этом соединим ячейку с источником тока так, чтобы заготовка служила анодом, а «резец» — катодом. Но этого мало. Катоду должна быть придана такая форма, чтобы он был антиподом изготовляемой детали. Там, где у последней должен быть выступ, у катода должно быть углубление, и наоборот.

Анод и катод следует располагать вблизи друг от друга так, чтобы их разделяла тонкая прослойка электролита. Приведем теперь электролит в быстрое движение, перекачивая

его через щель между анодом и катодом, и включим большой ток. Анод начнет растворяться. При этом скорость растворения будет тем выше, чем меньше сопротивление, то есть там, где пленка электролита тоньше. В том месте, где у резца выступ,— пойдет больший ток, анод будет растворяться быстрее и на его поверхности образуется углубление.

Быстрый приток электролита обеспечивает отвод растворяющегося вещества и доставку нового, свежего раствора. Постепенно обрабатываемая деталь приобретает требуемую форму. Таким способом можно создавать сложные рельефы поверхности, обрабатывать внутренность труб и выполнять ряд других сложных операций. Чем выше плотность идущего тока, тем быстрее растворяется анод и заготовка быстрее превращается в заданную деталь. Поэтому при электрохимической обработке применяются огромные плотности тока, достигающие тысяч ампер на квадратный сантиметр поверхности. А если к этому добавить, что на скорость обработки совершенно не влияют твердость и прочность металла (быстрота растворения анода, будь он из мягкий меди или хрупкого карбида вольфрама, зависит лишь от силы протекающего через него тока), то станет ясным, почему электрохимические методы день ото дня получают все большее признание.

В 1963—1964 годах советская промышленность начала массовый выпуск специализи-

рованных электрохимических станков. Их особенно целесообразно применять для обработки сложных фасонных деталей, от которых требуется высокая чистота поверхности, например лопастей паровых турбин и турбин турбореактивных двигателей, деталей из жаропрочных сплавов, твердых и хрупких металлов, плохо поддающихся обычному режущему инструменту.

При электрохимических методах инструмент практически не изнашивается, так как он не подвергается воздействию никаких механических нагрузок, а потому совсем не обязательно делать его из металла — проще и дешевле изготовить из дерева или пластмассы с нанесением токопроводящего слоя.

При растворении на катоде анода выделяются пузырьки водорода, который, смешиваясь с кислородом воздуха, образует гремучий газ — взрывчатое вещество большой силы. Поэтому при использовании таких установок приходится принимать необходимые меры предосторожности и прежде всего снабжать их специальными предохранительными устройствами.

Много интересных электрохимических установок создано также за рубежом. Так, американская фирма «Хангон-ван Уинкль майнинг компани» изготовила установку для электрохимической обработки сверхтвердых сплавов, в которых фильтры для очистки электролита сменяются автоматически. Если фильтр засорится, срабатывает реле давле-

ния и в действие входит другой фильтр, а сменный автоматически очищается. Это исключает дополнительные простои при смене и очистке фильтра.

ЗА ОДИН ПРИЕМ — САМОЛЕТНОЕ КРЫЛО

Тех, кто впервые знакомится с электрохимическим методом обработки изделия, всегда волнует вопрос: какого максимального размера детали можно обрабатывать этим прогрессивным методом? Ведь при обычных механических способах в этом «корень зла»: на станок, например, невозможно установить слишком длинный вал или колесо большого диаметра, а у пресса для детали большой площади может просто не хватить мощности. Для электрохимии подобных ограничений не существует.

Судите сами. Ванну любой емкости изготовить не так уж трудно. А дальше, пожалуйста, опускайте в нее хоть целое самолетное крыло или кусок специально профилированного инструмента. При включении тока электролит разъедает сразу всю поверхность предмета. Конечно, за исключением тех мест, которые покрыты специальным защитным слоем.

Кстати, защитный слой наносят порой и при изготовлении мелких деталей на инструмент — катод. Это очень выгодно. В самом деле, если на кусок жести или тонкой фольги нанести кружки или колечки токозащитным

составом, тогда за один прием удастся получить тысячи подкладок или шайб.

Одна из особенностей электрохимического метода обработки — это, как мы уже упоминали, отсутствие движущихся деталей. А что, если электрод — катод — оставить неподвижным, а заготовку — анод — вращать? Используя такой оригинальный принцип, в США изготовили электрохимический «токарный» станок. На нем можно обтачивать конусы и цилиндры, прорезать отверстие и канавки, обрабатывать торцы. Вращающаяся со скоростью 200 оборотов в минуту, деталь получается по сравнению с обычными механическими методами обработки более точной и гладкой.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПРОДОЛЖАЮТСЯ

Очень эффективно сочетание электрохимического процесса со шлифованием абразивом или алмазом на токопроводящей основе. Такая шлифовка, на первый взгляд, вроде бы ничем не отличается от обычной, механической: как и при ней, вращается деталь и шлифовальный круг. Однако исследования этого процесса показали, что абразивом снимается лишь одна десятая металла, а девять десятых — за счет электрохимического растворения. Роль круга здесь, таким образом, весьма скромна — он лишь разрыхляет образующуюся на поверхности детали окисную пленку, которая сдерживает растворение.

Сочетание электрохимических и механических методов значительно облегчает съем металла, что ведет к повышению производительности труда и экономии алмазов и даже абразивов в полтора-два раза.

Есть у нового метода и другие достоинства. При обычном шлифовании в местах контакта абразивных зерен с деталью развиваются очень большие температуры, вызывающие дополнительные трудности при обработке ряда высокопрочных и чувствительных к нагреву сплавов. При использовании же нового метода никакого повышения температур не происходит.

Еще одна профессия электрохимии. Радиоэлектроника и электроламповая промышленность — крупные потребители тончайшей проволоки из молибдена, вольфрама и фольги. Но как ее изготовить? Вытягивать проволоку обычными способами очень нелегко — все эти материалы обладают высокой твердостью и низкой пластичностью. И снова выход из положения помогает найти электрохимия. Обычная толстая вольфрамовая проволока просто-напросто протягивается через трубу, погруженную в ванну с электролитом. При этом анодом становится сама проволока, а катодом — труба. Совершая «путешествие» по катоду, проволока «худеет» до заданных размеров диаметром даже до 7—10 микрон.

А что, если толстую проволоку соединить с катодом, превратив охватывающую ее тру-

бу в анод? Тогда, как вы и сами, наверное, догадались, начнет растворяться в электролите труба.

ТЕПЛО «УМЕРЩВЛЕНО» В ЗАРОДЫШЕ

Итак, труба из нержавеющей стали, ставшая анодом, начнет быстро растворяться в электролите. Но ведь при этом внутренняя часть ее будет быстро очищаться от окалины и загрязнений. Труба станет гладкой, повысится ее стойкость против коррозии, а это приведет к большому экономическому выигрышу при дальнейшем ее использовании.

Электрохимия позволяет полировать не только трубы. Любая деталь — анод с шероховатой поверхностью, погруженный в раствор электролита,— при пропускании через нее тока быстро становится гладкой. Объяснение тому простое — на выступах и впадинах металл растворяется неравномерно и поверхность детали, в конечном счете, выравнивается, полируется.

Электрохимия позволяет обрабатывать и сварные швы. До сих пор они являются наиболее уязвимым местом любого аппарата, изготовленного с помощью сварки: центрифуг, газгольдеров, реакторов, химических колонн. Особенно трудно удалить из зоны сварки окалину. Ведь как только коррозия начнется, из металла сразу же станут выпадать шлаковые включения. Нарушится гер-

метичность соединения, и аппарат выйдет из строя.

Конечно, от окалины можно избавиться и обычными механическими средствами — проволочными щетками или пневматическими зубилами, но операция эта очень трудоемкая. Не удается здесь применить и электрополировку — при ней пришлось бы сооружать ванну преогромнейших размеров.

И тогда ученые предложили интересный выход — совместить электрополировку с так называемым выносным катодом. А в роли катода может выступать простая малярная кисть, снабженная токоподводящим приспособлением. Ее присоединяют к отрицательному полюсу источника тока, а очищаемое изделие к положительному. Дальнейший процесс протекает так: кистью, которую время от времени смачивают электролитом, водят по очищаемому месту. Оно становится все более гладким и наконец отполировывается. Светлую блестящую поверхность остается промыть водой и обдуть сжатым воздухом.

Все теснее дружба с электрохимией и у инструментальщиков. Один из самых основных врагов инструмента, вызывающих его преждевременную «старость»,— высокая температура. Подвергнутый при обработке сильному нагреву, металл слабее сопротивляется ему, быстрее изнашивается. Как же быть? Видимо, лучше всего в самом зародыше уничтожить источник тепла и тем самым предохра-

нить внутренние связи металла от разрушения.

А тепло своим появлением при резании обязано в основном трению. Стружка, сбегая с детали, трется с большой силой о кромки метчиков, сверл, о переднюю грань резца. Стоит использовать электрополирование, как коэффициент трения сразу резко снизится, он будет в три-четыре раза ниже, чем при механической полировке. Само собой разумеется, что в конечном счете стойкость инструмента резко возрастет.

КАК ОТРЕМОНТИРОВАТЬ ВАЛ?

«Ничто не вечно под луной» — гласит старое изречение. Приходит время, и начинают разрушаться даже самые прочные детали. Как же восстановить их форму и прежние размеры? За советом и помощью идут к электрохимикам.

Допустим, износилась поверхностная часть вала. Восстановление осуществляется просто. Вал опускают в раствор соли того металла, из которого он сделан сам. Полученную электролитическую ячейку подключают к источнику тока. При этом ионы металла разряжаются и оседают на вал, покрывая его металлическим слоем.

А чтобы наращивание происходило только в нужном месте, анод располагают строго определенным образом. Постепенно деталь,

принимая первоначальную форму, обретает вторую молодость.

Многие выгоды сулит и использование разработанной в ФРГ установки для травления металла. Происходит это так: пары, выделяющиеся при травлении, всасываются с помощью устройств, действующих подобно водяным насосам. Через эти устройства под давлением подается раствор, который нейтрализует пары и уносит их с собой.

По мере поступления в ванну для нейтрализации, расположенную среди травильных ванн, газы проходят через слой специальной пены. В итоге они вылавливаются, нейтрализуются практически на 100 процентов. А раствор всасывается, затем используется вновь — каждая операция идет по замкнутому циклу. Нейтрализующая жидкость остается в цикле вплоть до полной утраты своих нейтрализующих свойств. Эта установка сама по себе занимает мало места и не нуждается в каком-то особом уходе.

...Таким образом, диапазон использования электрохимических методов очень широк — от изготовления деталей даже самой сложной формы до травления металлов и полирования изделий. И что очень важно. Меняя напряжение, силу тока и температуру электролита, можно устанавливать любой наперед заданный режим работы — жесткий обдирочный, отделочный мягкий.

Однако сказать, что в области электрохимических методов обработки уже постиг-

нуты все тайны и больше нет «белых пятен», конечно же, нельзя. Ученым-электрохимикам предстоит еще открыть немало интересного, создать множество совершеннейших методов, гарантирующих получение большого экономического эффекта, облегчающих труд и несущих радость людям.

СОДЕРЖАНИЕ

Юрий Николаевич Бережной
Владимир Сафронович Синедубский

ХИМИЯ — ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Редактор И. М. Поспелова
Художник Ю. В. Самсонов
Худож. редактор В. В. Щукина
Технич. редактор А. С. Елагин
Корректор В. А. Черенкова

Сдано в набор 18/VIII-65 г. Подпис. к печ. 21/V-1966 г. Формат. бум. $70 \times 90^1/_{32}$. Физ. печ. л. 4,0. Усл. печ. л. 4,68. Уч.-изд. л. 4,2. Изд. инд. НА-5. А14525. Тираж 16 000 экз. Цена 13 коп. Бум. № 2. Темплан 1965 г. № 60.

Издательство «Советская Россия». Москва, проезд Сапунова, 13/15.

Книжная фабрика № 1 Росглавполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров РСФСР, г. Электросталь Московской области, Школьная, 25. Заказ № 697.

К ЧИТАТЕЛЯМ

Издательство просит отзывы об этой книге и пожелания прислать по адресу: Москва, Центр, проезд Сапунова, д. 13/15, издательство «Советская Россия».

Издательство
«Советская Россия»

Вышла в свет книга:

Смелый поиск. Коллектив авторов. 168 стр., 2200 экз., цена 15 коп.

Дмитрий Васильевич Конюхов ускорил плавку на своей печи на 2 минуты.

— Подумаешь, мелочь! — рассуждают некоторые.

Но это не мелочь. Когда эти минуты стали экономить на всех печах Липецкого металлургического комбината, это дало такой эффект, что даже маловеры были убеждены. Больше того — напарник командира соседней печи Иван Луговой, как бы продолжая мысль Конюхова, прибавил к этим двум минутам одну свою. И опять — для всех. А мысль продолжает работать. Как же удалось победу одного сделать победой всех?

На этот вопрос дается ответ в книге.

Это публицистический рассказ о новаторах, которые внедряют новое, передовое в производство, о их творческом пути, о роли партийных, профсоюзных организаций в деле распространения опыта лучших. Книга написана на материалах металлургических предприятий РСФСР, в том числе «Электростали», Челябинского электрометаллургического, Магнитогорского, Череповецкого, Липецкого комбинатов.

Книга продается в магазинах Книготорга и потребительской кооперации.

о в.

вку

еко-

око-
еко-
аже
пар-
как
тим
. А
ось

рах,
вод-
ых,
ане-
риа-
том
тал-
ого,

по-

13 коп.

· СОВЕТСКАЯ РОССИЯ ·